

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ АЗЕРБАЙДЖАНСКОЙ  
РЕСПУБЛИКИ**

**АЗЕРБАЙДЖАНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Рукопись в праве:**

**Гашимов Ниджат Яшар оглы (М361R7)**

**Шафиев Эльдар Руфаддин оглы (М361R3)**

**Казымов Мухаммед Джахангир оглы (М361R3)**

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**на тему**

**ИЗМЕРЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ  
СИСТЕМ**

**Специальность: 060627-“Электроника, телекоммуникация и  
радиотехника”**

**Специализация: “Информационная безопасность телекоммуникационных  
систем” (М361R7-Гашимов Н.Я)**

**“Сети, связь и распределение информации” (М361R3- Шафиев Э.Р ,  
Казымов М.Д)**

**Научный руководитель:**

**д.т.н. Рагимов А.Т.**

**БАКУ - 2023**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВСТУПЛЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>ГЛАВА 1. ТОЧНОСТЬ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Факторы, влияющие на точность радиолокационных измерений. ....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Точность измерения диапазона .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3. Точность углового измерения.....</b>	<b>12</b>
<b>1.4. Точность измерения скорости .....</b>	<b>17</b>
<b>ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕЛИ. ....</b>	<b>22</b>
<b>2.1. Измерение характеристик цели радиолокационными системами.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2. Мультирадарные измерения.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3. Сглаживание измерений и отслеживание.....</b>	<b>31</b>
<b>2.4. Методы радиолокационного слежения.....</b>	<b>36</b>
<b>ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЧЕРЕЗ VBA SOFTWARE.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1. Измерение точности измерения диапазона через vba soft.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2. Измерение точности углового измерения через vba soft. ....</b>	<b>40</b>
<b>3.3. Измерение точности измерения доплеровской скорости через vba soft. ....</b>	<b>42</b>
<b>3.4. Функция radvelerror_mps.....</b>	<b>44</b>
<b>3.5 Функция crossvelerror_mps .....</b>	<b>45</b>
<b>3.6 Функция predict_error_km .....</b>	<b>48</b>
<b>ГЛАВА 4. ВЫЧИСЛЕНИЕ .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1. Задача 1 .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2. Задача 2 .....</b>	<b>53</b>
<b>ВЫВОД.....</b>	<b>57</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>58</b>
<b>СПИСОК АБРЕВИАТУРЫ.....</b>	<b>60</b>

## ВСТУПЛЕНИЕ

Радиолокационные измерительные системы - это класс электронных систем, способных обнаруживать, отслеживать и измерять расстояние, направление и скорость объектов в их окружении. Слово "радар" - это аббревиатура от слова "Радиообнаружение и дальномерность". Радиолокационные системы используют электромагнитные волны, обычно радиоволны, для передачи и приема сигналов, которые отражаются от объектов на их пути. Анализируя отраженные сигналы, радиолокационные системы могут определять местоположение, размер и скорость объектов, находящихся в их поле зрения.

Радиолокационные системы имеют широкий спектр применений, включая управление воздушным движением, военную оборону, прогнозирование погоды и поисково-спасательные операции. В управлении воздушным движением радиолокационные системы используются для отслеживания местоположения и скорости воздушных судов и предотвращения столкновений между ними. В военной обороне радиолокационные системы идентифицируют и отслеживают приближающиеся ракеты и самолеты. Метеорологические радарные системы измеряют осадки и другие атмосферные явления, чтобы предоставить информацию для прогнозирования погоды.

Радиолокационные системы могут быть сконструированы таким образом, чтобы работать на различных частотах, в зависимости от их предполагаемого использования. Более низкие частоты, такие как S-диапазон или L-диапазон, полезны для обнаружения крупных объектов на больших расстояниях, в то время как более высокие частоты, такие как X-диапазон или Ka-диапазон, лучше подходят для обнаружения небольших объектов на более коротких расстояниях.

Таким образом, радиолокационные измерительные системы - это комплексные системы, которые используют электромагнитные волны для обнаружения, отслеживания и измерения объектов и широко используются в

различных областях применения, от управления воздушным движением до прогнозирования погоды и военной обороны.

Эта диссертация позволяет:

- Понимать источники ошибок радиолокационных измерений и факторы, влияющие на точность радиолокационных измерений;
- Понять количественную оценку точности радиолокационных измерений дальности, угла и скорости цели;
- Знать, как объекты цели измеряются радаром, и количественно оценивать точность измерения общих объектов;
- Понимать повышение точности измерений и другие возможности, обеспечиваемые мультирадарными измерениями и мультилатерацией с одним радаром;
- Понимать концепции сглаживания измерений и отслеживания целей, а также общие методы реализации отслеживания.

Хотя радиолокационный поиск и обнаружение цели необходимы для использования радара, большинство приложений также требуют измерения характеристик цели. Они могут включать положение и скорость цели, как описано во Главе 1 в разделах 1.1-1.4, а также показатели размера, формы и вращения цели, как описано во Главе 2 в разделе 2.1. Использование нескольких радаров для повышения точности измерений обсуждается во Главе 2 в разделе 2.2. Объединение радиолокационных измерений в треки цели, проблемы, связанные с радаром отслеживание и методы отслеживания обсуждаются во Главе 3 в разделах 3.1-3.2.

## ГЛАВА 1. ТОЧНОСТЬ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.

### 1.1. Факторы, влияющие на точность радиолокационных измерений.

Радар может обеспечивать измерение положения цели по дальности и в двух угловых координатах относительно местоположения радара. Угловые координаты обычно определяются как угол возвышения относительно местной горизонтали и азимут, который может быть измерен относительно истинного севера, или, для фазированных решеток, относительно азимута широкого борта решетки. Эта геометрия измерения проиллюстрирована на рисунке 1.1. Радары, использующие когерентную обработку, могут также непосредственно измерять радиальную скорость цели. Чтобы измерить характеристики цели, она должна быть распознана радаром. В этом требуется, чтобы цель была отделена от других целей разрешением радара по крайней мере в одной из координат измерения. Разрешение радара по углу обычно определяется шириной луча в двух ортогональных угловых координатах, обычно по азимуту и углу возвышения. Требуемое расстояние до цели,  $D$ , в угловой координате, часто называемое расстоянием по дальности, задается формулой:

$$D = R\theta \quad 1.1$$

где  $\theta$  - ширина луча радара в угловой координате, а  $R$  - дальность до цели. Эта геометрия измерения проиллюстрирована на рисунке 1.1. Радары, использующие когерентную обработку, могут также непосредственно измерять радиальную скорость цели. Радар может обеспечивать измерение положения цели по дальности и в двух угловых координатах относительно местоположения радара. Хотя радиолокационный поиск и обнаружение цели необходимы для использования радара, большинство приложений также требуют измерения характеристик цели.

Разрешающая способность радара по дальности,  $R$ , определяется по формуле:

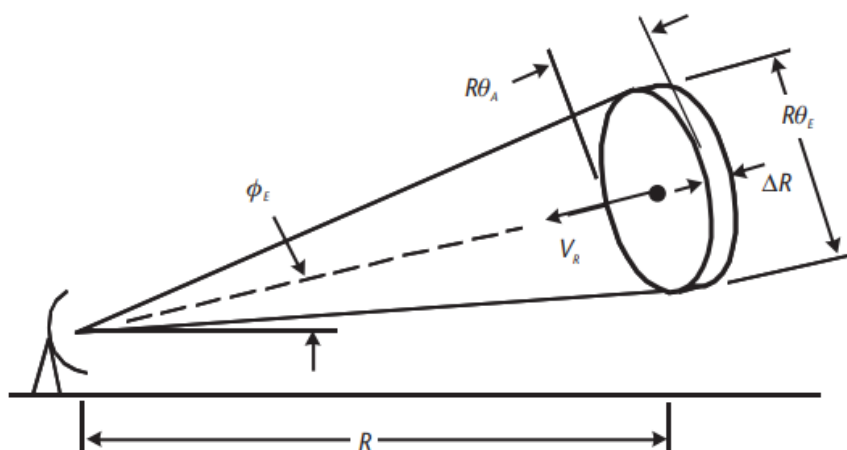


Рисунок 1.1 Геометрия для радиолокационных измерений и разрешение цели.

$$\Delta R = \frac{c \tau_R}{2} = \frac{c}{2B} \quad 1.2$$

где  $\tau_R$  - разрешение радара во времени, которое приблизительно равно обратной ширине полосы пропускания сигнала,  $B$ . Геометрия ячейки разрешения радара показана на рис. 1.1.

Цели, которые занимают одну и ту же ячейку разрешения по дальности и углу, могут быть определены по радиальной скорости радаром, использующими

$$\Delta V = \frac{\lambda f_R}{2} = \frac{\lambda}{2\tau} \quad 1.3$$

когерентную обработку. Разрешение по скорости,  $\Delta V$ , задается формулой:

где  $f_R$  - разрешение сигнала радара по Доплеровской частоте, которое приблизительно равно обратной величине общей длительности сигнала  $\tau$ . Обратите внимание, что разрешение требуется только в одном измерении, чтобы можно было измерить целевые характеристики.

Точность, с которой радар может измерять характеристики цели, определяется несколькими источниками ошибок:

- $S/N$  это случайная погрешность измерения. Эти ошибки изменяются в зависимости от  $(S/N)^{-1/2}$ .
- Случайная ошибка измерения с фиксированным стандартным отклонением, вызванная источниками шума на последних каскадах радиолокационного приемника. Эти ошибки обычно невелики и соответствуют независимым от  $S/N$  ошибкам, возникающим при больших значениях  $S/N$ . Таким образом, они устанавливают ограничение на то, насколько случайные ошибки могут быть уменьшены за счет увеличения  $S/N$ .
- Ошибка смещения, связанная с процессом калибровки и измерения радара. Эти ошибки могут случайным образом изменяться в зависимости от смещения при калибровке радара, только при больших временах корреляции по сравнению с обычным периодом наблюдения радаром.
- Ошибки, обусловленные условиями распространения радиолокатора, или неточности в корректировке условий распространения. Компоненты этих ошибок могут случайным образом изменяться от наблюдения к наблюдению, как ошибки измерений, выполненных радаром, или оставаться фиксированными в течение длительного времени, как ошибки смещения радара.
- Ошибки из-за источников помех, таких как радиолокационные помехи, а также сигналы радиолокационных помех.
- Ошибки, вызванные мерцанием мишени.

Первые три источника ошибок, описанные выше, зависящие от  $S/N$ , фиксированные случайные и смещение, обсуждаются в этой главе. Ошибки, связанные с распространением, помехами, глушением, мерцанием и бликами, могут быть оценены с использованием методов, описанных в других разделах этой книги и в ссылках. Эти ошибки могут быть объединены с зависящими от  $S/N$ , фиксированными случайными ошибками и ошибками смещения для получения трех основных компонентов ошибки.

В анализах, приведенных в этом разделе, точность радара характеризуется стандартным отклонением гауссова распределения, обозначаемого  $\sigma$ , которое разумно моделирует распределения ошибок измерений для многих представляющих интерес случаев. Для многих приложений целесообразно использовать значения, кратные  $\sigma$ , для характеристики внешней границы распределения ошибок. Вероятность того, что одномерное измерение произойдет между несколькими заданными границами погрешности для этого распределения, приведена в таблице 1.1.

Например, половина измерений будет выполняться в диапазоне  $\pm 0,675 \sigma$ . Только 1 из 370 измерений будет выполнено за пределами границы  $\pm 3\text{-}\sigma$ .

Таблица 1.1. Границы ошибок и вероятности их возникновения

<b>ГРАНИЦА ОШИБКИ</b>	<b>ВЕРОЯТНОСТЬ ТОГО, ЧТО ИЗМЕРЕНИЕ ПРОИЗОЙДЕТ В ПРЕДЕЛАХ ДОПУСТИМОЙ ПОГРЕШНОСТИ</b>
0.675 $\sigma$	0.5
1 $\sigma$	0.683
2 $\sigma$	0.955
3 $\sigma$	0.997
4 $\sigma$	0.9994

## 1.2. Точность измерения диапазона

Импульсный радар определяет дальность действия радара  $R$  путем измерения

$$R = ct/2 \quad 1.4$$

временного интервала  $t$  между переданным и принятым сигналом:

В ранних радарх время приема измерялось путем наблюдения за отражением импульса на дисплее, таком как оптический прицел. Некоторые более поздние радары используют автоматическое измерение дальности с



использованием двух смежных элементов определения дальности, называемых ранними и поздними элементами. Когда энергия в двух затворах равна, время пересечения между затворами находится в центре принятого импульса. Многие современные радары производят выборку принятого сигнала и определяют дальность до цели, сопоставляя выборочные данные с точной копией импульса.

Точность измерения диапазона характеризуется среднеквадратичной погрешностью измерения  $\sigma_R$ , определяемой как сумма корней в квадрате (root-

$$\sigma_R = (\sigma_{RN}^2 + \sigma_{RF}^2 + \sigma_{RB}^2)^{1/2} \quad 1.5$$

sum-square (rss)) трех составляющих погрешности.

$\sigma_{RN}$  =  $S/N$ -зависимая от случайного диапазона погрешность измерения;

$\sigma_{RF}$  = фиксированная случайная ошибка дальности, rss радар фиксирует случайную ошибку дальности и случайную ошибку дальности от распространения;

$\sigma_{RB}$  = ошибка смещения дальности, rss ошибки смещения дальности радар и ошибка смещения дальности от распространения.

Ошибка, зависящая от  $S/N$ , обычно преобладает над ошибкой дальности действия радар. Это случайное значение со стандартным отклонением:

$$\sigma_{RN} = \frac{\Delta R}{\sqrt{2(S/N)}} = \frac{c}{2B\sqrt{2(S/N)}} \quad 1.6$$

Для измерений с одним импульсом значение  $S/N$  в формуле 1.6 равно  $S/N$  с одним импульсом (при условии, что  $S/N$  достаточно велико, чтобы можно было пренебречь потерями при обнаружении).

При использовании нескольких импульсов следует использовать интегрированное значение  $S/N$  (формула 1.6). При использовании радаров с фазированной антенной решеткой и радиолокаторов слежения за тарелками обычно предполагается, что тар находится вблизи центра луча, как обсуждалось

выше. Если это не так, то соответствующие потери формы луча,  $L_{BS}$ . При использовании вращающегося поискового радара измерения производятся по мере прохождения луча мимо цели, и потери формы луча,  $L_{BS}$ . (обычно 1,6 дБ), должны быть включены в расчет  $S/N$ . Если интегрирование импульсов приводит к потерям при обработке сигнала,  $L_{SPI}$ , интегрированный сигнал/шум должен быть уменьшен на величину этих потерь.

Фиксированная случайная погрешность измерения диапазона может ограничивать точность измерения диапазона при больших значениях  $S/N$ . Внутренний радиолокационный шум обычно создает эквивалентное соотношение сигнал/шум от 25 до 35 дБ, что приводит к случайным фиксированным ошибкам в размере от 1/25 до 1/80 от разрешения по дальности. Случайные ошибки дальности, вызванные распространением, обычно невелики, за исключением случаев, когда существуют условия многолучевости.

Величина ошибок смещения дальности действия радара обычно зависит от того, насколько тщательно они уменьшаются. Поскольку ошибки смещения постоянны для серии измерений или для нескольких целей в одном и том же общем районе, они не влияют на радиолокационное слежение или относительное местоположение целей. Таким образом, во многих радарах прилагается мало усилий для уменьшения ошибок смещения дальности, и они могут достигать значений в десятки метров. Когда важно абсолютное положение цели, тщательная калибровка может снизить погрешности смещения радиолокационной дальности до уровня случайных ошибок фиксированной дальности. Ошибки смещения диапазона в зависимости от условий распространения обычно невелики.

Например, радар, имеющий полосу пропускания формы сигнала  $B = 1$  МГц, имеет разрешение по дальности  $\Delta R = 150$  м. Если соотношение сигнал/шум (одиночный импульс или интегрированный) составляет 15 дБ,  $\sigma_{RN} = 18,9$  м. Если фиксированная погрешность,  $\sigma_{RF}$ , в 0,02 раза превышает разрешение (3 м), а погрешность смещения,  $\sigma_{RB} = 10$  м, то общая точность измерения дальности,  $\sigma_R$

= 21,6 м. Относительная погрешность между наблюдениями или целями рассчитывается без учета погрешности смещения:  $\sigma_R = 19,1\text{м}$ .

Дополнительные примеры расчетов погрешности измерения дальности приведены в таблице 1.2. Во втором столбце показана погрешность измерения дальности при использовании одиночного импульса с показанным значением  $S/N$ . Общая ошибка - это rss трех компонентов, показанных в столбце. Соответствующая относительная погрешность указана в столбце 3. В этом случае ошибка смещения не включается в комбинацию rss, что приводит к меньшему значению ошибки. Столбцы 4 и 5 показывают влияние интегрирования импульсов. Десять импульсов когерентно интегрированы в столбце 4 и некогерентно интегрированы в столбце 5, что дает показанные интегрированные значения  $S/N$ .

Таблица 1.2. Примеры измерения дальности.

ПАРАМЕТР	ОДИНОЧНЫЙ ИМПУЛЬС	ОДИНОЧНЫЙ ИМПУЛЬС (ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ)	ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ	НЕКОГЕРЕНТНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ
$\Delta R$	15m	15m	15m	15m
Частота импульсов $S/N$	8 dB	8 Db	8 dB	8 dB
$n$	1	1	10	10
Интегрированный $S/N$	N/A	N/A	18 dB	17.4 dB
$\sigma_{RN}$	4.22m	4.22m	1.34m	1.44m
$\sigma_{RF}$	0.5m	0.5m	0.5m	0.5m
$\sigma_{RB}$	1.0m	N/A	1.0m	1.0m
$\sigma_R$	4.37m	4.25m	1.75m	1.82m

### 1.3. Точность углового измерения

Радиолокационные угловые измерения обычно выполняются с использованием моноимпульсных приемных антенн, которые генерируют одновременные приемные лучи, слегка смещенные по углу в любую сторону от передающего луча. Разностная диаграмма, формируемая этими лучами, может быть использована для измерения углового положения цели с помощью передачи одного сигнала. Другие методы измерения угла включают передачу и прием множества сигналов под разными углами вокруг цели. При использовании вращающегося поискового радара угловое положение цели может быть измерено путем нахождения центра серии возвратных импульсов, когда антенна проходит мимо цели. Ранние радары слежения либо использовали аналогичную технику, либо передавали луч в нескольких положениях вокруг цели и определяли угловое положение, в котором антенна проходит мимо цели. отдача сигнала была максимальной. Для непостоянных целей эти методы могут обеспечить точность измерения угла, сравнимую с точностью моноимпульсного радара.

Точность измерения по каждой угловой координате характеризуется среднеквадратичной погрешностью измерения  $\sigma_A$ , определяемой rss трех

$$\sigma_A = (\sigma_{AN}^2 + \sigma_{AF}^2 + \sigma_{AB}^2)^{1/2} \quad 1.7$$

составляющих погрешности.

$\sigma_{AN}$  =  $S/N$  -зависимая случайная погрешность измерения угла;

$\sigma_{AF}$  = угловая фиксированная случайная ошибка, rss радара фиксированная случайная угловая ошибка и случайная угловая ошибка от распространения;

$\sigma_{AB}$  = ошибка углового смещения, rss ошибки углового смещения радара и ошибка углового смещения при распространении.

Ошибка, зависящая от  $S/N$ , обычно преобладает над ошибками радиолокационного угла. Это случайное значение со стандартным отклонением,

$$\sigma_{AN} = \frac{\theta}{k_M \sqrt{2(S/N)}} \quad 1.8$$

заданным для моноимпульсного радара с помощью:

где  $\theta$  - ширина луча радара в угловой координате измерения, а  $k_M$  - наклон разности моноимпульсных диаграмм направленности. Значение  $k_M$  обычно равно 1,6. Для одноимпульсных измерений используется значение  $S/N$  для одиночного импульса (формула 1.8), в то время как для многоимпульсных измерений используется интегрированное значение  $S/N$ , как описано в разделе 1.1 для точности измерения дальности. Как и в предыдущем обсуждении, при расчете  $S/N$  следует использовать потери при обработке сигнала в результате интегрирования и потери формы луча, когда это уместно.

Помехи и помехи от радара могут влиять на суммарный и разностный каналы радара иначе, чем источники Гауссовского шума. В таких случаях рассматривать их воздействие как вклад в  $S/N$  с использованием (формула 1.8) неверно, и для получения точных результатов необходим более сложный анализ.

Уравнение (формула 1.8) со значением  $k_M = 1,6$  также дает приблизительную угловую погрешность для немногоимпульсных радаров, которые используют многоимпульсные измерения неизменяющихся целей. Поправки для изменяющихся целей с использованием многоимпульсных измерений.

Как и при измерении дальности, фиксированные угловые случайные ошибки могут ограничивать точность измерения угла при больших значениях  $S/N$ . Типичные уровни внутреннего радиолокационного шума, рассмотренные выше, привели бы к угловым погрешностям от 1/40 до 1/125 ширины луча. Иногда это называют максимальным коэффициентом расщепления луча, равным 40 к 125. Случайные угловые ошибки, обусловленные распространением, обычно

невелики. Величина ошибок углового смещения радара зависит от того, насколько тщательно они уменьшаются. Поскольку ошибки смещения постоянны для серии измерений или для нескольких измерений  $\tan$  в одном и том же общем районе, они не влияют на радиолокационное слежение или относительное местоположение целей. При тщательной калибровке ошибки углового смещения радара, возникающие в результате калибровки радара, могут быть снижены до уровня фиксированных угловых ошибок. Ошибки углового смещения в результате распространения могут быть значительными, если их не исправить, особенно ошибки угла возвышения при малых углах возвышения, как обсуждалось в главе 9. Ошибки наведения радара могут быть уменьшены путем отслеживания целей с известными местоположениями или путем отслеживания спутников на части их траекторий. Ошибки распространения в тропосфере могут быть уменьшены путем внесения поправки на известные или предполагаемые условия.

Например, для ширины луча азимутального радара, равной 1 градусу, и  $S/N = 12$  дБ,  $\sigma_{AN} = 0,11$  градуса, или 1,9 мрад. Если  $\sigma_{AF} = 0,2$  мрад и  $\sigma_{AB} = 0,5$  мрад, то общая погрешность измерения азимута составляет  $\sigma_A = 2,0$  мрад.

Другим источником угловой ошибки, не анализируемым здесь, является целевой отблеск. Отблеск - это эффект рассеивания мишеней, разделенных в поперечном направлении, вызывающий колебания видимого угла прихода обратного сигнала. Они могут превышать угловую протяженность цели и могут быть основным источником угловой ошибки на малых дальностях (например, при использовании радара самонаведения цели).

При использовании радара с фазированной антенной решеткой параметры, определяющие погрешности угловых измерений, могут изменяться в зависимости от угла сканирования луча вне зоны обзора. Ширина луча массива:

$$\theta_{\varphi} = \theta_B / \cos \varphi \quad 1.9$$

Фиксированные угловые ошибки и ошибки смещения,  $\sigma_{AF}$  и  $\sigma_{AB}$ , могут иметь компоненты, которые не зависят как от угла сканирования, так и от зависящих от сканирования компонентов, которые определены в синусоидальном пространстве. Последние приводят к погрешностям измерения угла, которые приблизительно пропорциональны  $1/\cos \phi$ . Ошибки, которые не зависят от угла сканирования, могут включать атмосферные ошибки и ошибки смещения из-за неизвестной ориентации матрицы. Ошибки, зависящие от сканирования, могут возникать из-за ошибок в расположении элементов и относительной фазировке. Величина ошибки при определенном угле сканирования представляет собой rss неизменяющегося и изменяющегося компонентов ошибки.

В предыдущем примере, если угол сканирования по азимуту за бортом составляет 30 градусов, ширина луча по азимуту увеличивается до 1,15 градусов и  $\sigma_{AN} = 2,2$  мрад. Если дополнительный компонент фиксированной случайной ошибки, зависящий от сканирования, равен  $0,0001 \sin \phi$  (часто называемый 0,1 мсин),  $\sigma_{AF} = (0,202 + 0,112)^{1/2} = 0,23$  мрад. Аналогично, при дополнительной ошибке смещения по азимуту, зависящей от сканирования, равной 0,3 мсин,  $\sigma_{AB} = 0,61$  мрад. Общая погрешность измерения азимута  $\sigma_A = 2,3$  мрад. Эти примеры погрешностей измерения угла обобщены в таблице 1.3. Параметры измерения и погрешности приведены в первой колонке. Ошибки для антенного радара рассчитаны в столбце 2, где луч не расширяется при боковом сканировании, и ошибки, зависящие от сканирования, не применяются. Ошибка, зависящая от  $S/N$ , составляет 1,9 мрад, и общая ошибка определяется rss в сочетании с фиксированной случайные значения и погрешности смещения. В столбце 3 показаны результаты для фазированной антенной решетки. Ширина луча при угле сканирования  $30^\circ$  составляет  $1,15^\circ$ , а погрешность, зависящая от соотношения сигнал/шум, увеличивается до 2,2 мрад (при условии, что соотношение сигнал/Шум остается на уровне 12 дБ). Фиксированные случайные ошибки и ошибки смещения обнаруживаются с помощью rss, объединяющего компоненты, не зависящие от сканирования, и компоненты, зависящие от

сканирования, и результирующая общая ошибка вычисляется как rss этих терминов.

В зависимости от требуемой точности компоненты угловой погрешности измерения могут быть рассчитаны для каждого интересующего угла сканирования или могут использоваться средние значения.

Погрешность измерения, нормальная для LOS радара, называемая ошибкой поперечной дальности, определяется путем умножения угловой погрешности измерения (в радианах) на дальность цели. Погрешность измерения положения цели в поперечном диапазоне в угловом координированном направлении  $\sigma_D$  определяется по формуле:

$$\sigma_D = R\sigma_A \quad 1.10$$

Результирующий объем неопределенности цели имеет стандартные отклонения в измерениях поперечного диапазона  $R_{\sigma A1}$  и  $R_{\sigma A2}$ , где числа относятся к ортогональным угловым координатам, и стандартное отклонение в измерении диапазона  $\sigma_R$ . Для большинства радаров погрешности измерения поперечной дальности, возникающие в результате ошибок измерения угла на полезных дальностях, намного превышают погрешности измерения дальности. Результирующий объем неопределенности цели представляет собой относительно плоский, круглый или эллиптический диск, расположенный перпендикулярно радиолокационному LOS, как показано на рисунке 1.1. Ошибки, которые не зависят от угла сканирования, могут включать атмосферные ошибки и ошибки смещения из-за неизвестной ориентации матрицы. Ошибки, зависящие от сканирования, могут возникать из-за ошибок в расположении элементов и относительной фазировке. Величина ошибки при определенном угле сканирования представляет собой rss неизменяющегося и изменяющегося компонентов ошибки.



Таблица 1.3. Примеры ошибок угловых измерений

ПАРАМЕТР	РАДАР С ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННОЙ	РАДАР С ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ
$\Theta$	1°	1° (broadside)
$\phi$	N/A	30°
$\Theta$	N/A	1.15°
$S/N$	12.4дБ	12 дБ
$\sigma_{AN}$	1.9 мрад	2.2 мрад
Стационарный	0.2 мрад	0.2 мрад
Стационарный зависящий от сканирования	N/A	0.1 мсин
$\sigma_{AF}$	0.2 мрад	0.23 мрад
Смещенный	0.5 мрад	0.5 мрад
Смещенный зависящий от сканирования	N/A	0.3 мсин
$\sigma_{AB}$	0.5 мрад	0.61 мрад
$\sigma_A$	2.0 мрад	2.3 мрад

#### 1.4. Точность измерения скорости

Радиальная скорость цели может быть измерена двумя способами:

- По Доплеровскому сдвигу частоты принимаемого сигнала;
- По результатам измерений в нескольких диапазонах.

Измерения с использованием Доплеровского сдвига частоты почти всегда дают значительно лучшую точность, чем некогерентная обработка измерений дальности.

Когерентный радар может измерять радиальную скорость цели,  $V_R$ , по

$$V_R = \lambda f_D / 2 \quad 1.11$$

доплеровскому сдвигу частоты принимаемого сигнала:

где  $f_D$  - доплеровский сдвиг частоты, а  $\lambda$  - длина волны радиолокационного сигнала.

Точность измерения лучевой скорости на основе измерения доплеровского сдвига частоты характеризуется среднеквадратичной погрешностью измерения

$$\sigma_V = (\sigma_{VN}^2 + \sigma_{VF}^2 + \sigma_{VB}^2)^{1/2} \quad 1.12$$

$\sigma_V$ , определяемой rss трех составляющих погрешности.

где:

$\sigma_{VN}$  = зависящая от  $S/N$  случайная погрешность измерения лучевой скорости;

$\sigma_{VF}$  = фиксированная случайная ошибка радиальной скорости, rss радара фиксирует случайную ошибку радиальной скорости и случайную ошибку радиальной скорости при распространении;

$\sigma_{VB}$  = ошибка смещения радиальной скорости, rss ошибки смещения радиальной скорости радара и ошибка смещения радиальной скорости в результате распространения.

Ошибка, зависящая от  $S/N$ , обычно преобладает над ошибкой радиальной скорости радара. Это случайное значение со стандартным отклонением,

$$\sigma_{VN} = \frac{\lambda}{2\tau\sqrt{2(S/N)}} = \frac{\Delta V}{\sqrt{2(S/N)}} \quad 1.13$$

заданным:

где  $\tau$  - длительность радиолокационного сигнала, который когерентно обрабатывается, а  $\Delta V$

- разрешение по лучевой скорости, заданное по формуле (1.3). Как и при измерениях в предыдущих двух разделах, может использоваться одноимпульсный или интегрированный сигнал/шумоподавление, и должна применяться соответствующая обработка интегрирования и потери формы луча.

Фиксированная случайная погрешность радиальной скорости может ограничить точность измерения при очень больших значениях  $S/N$ . Случайные ошибки радиальной скорости, обусловленные распространением, обычно невелики. Величина ошибок смещения радиальной скорости радара зависит от мер, принимаемых для их уменьшения. При тщательной калибровке они могут быть сведены к уровню случайных погрешностей радиальной скорости. Ошибки смещения, зависящие от условий распространения, обычно невелики.

Целевая радиальная скорость также может быть определена по разнице двух измерений дальности, деленной на время между измерениями:

$$V_R = \frac{R_1 - R_2}{t_1 - t_2} \quad 1.14$$

где  $R_1$  и  $R_2$  - диапазоны, а  $t_1$  и  $t_2$  - соответствующие времена измерения.

Результирующая точность определения радиальной скорости определяется по

$$\sigma_V = \frac{\sqrt{2} \sigma_R}{(t_1 - t_2)} \quad 1.15$$

формуле:

Ошибка смещения,  $\sigma_{RB}$ , не должна включаться в  $\sigma_R$  для этого расчета, поскольку она будет постоянной для двух измерений.

Для  $n$  периодических измерений в течение периода времени  $t_N$  этот результат

$$\sigma_V = \frac{\sqrt{12} \sigma_R}{\sqrt{n} t_N} \quad 1.16$$

может быть расширен до:

PRF для этих параметров равен  $n/t_N$ . Этот результат получен для последовательности импульсов, содержащей много импульсов. При  $n < 6$  (1.15) вычисляет меньшую ошибку, чем (1.16), и ее следует использовать.

При сопоставимом времени обработки измерение доплеровской частоты обеспечивает гораздо большую точность в виртуальной реальности, чем некогерентные режимы, описанные выше. Для например, в S-диапазоне ( $\lambda = 0,09\text{м}$ ), при длительности импульса  $\tau = 1$  мс и  $S/N = 15$  дБ,  $\sigma_{VN} = 5,7$  м/с с использованием доплеровской обработки. Предполагая разрешение по диапазону 15 м ( $B = 10$  МГц) и  $S/N = 15$  дБ,  $\sigma_{RN} = 1,9$  м. Два импульса, разделенные 1 мс, дадут  $\sigma_{VN} = 2680$  м/с, что намного больше ошибки при доплеровской обработке. Два импульса должны были бы быть разделены на 471 мс, чтобы обеспечить точность, сравнимую с точностью при использовании доплеровской обработки. При использовании этих импульсов с частотой PRF 1000 Гц потребовалось бы 110 импульсов за период 110 мс, чтобы обеспечить ту же точность определения лучевой скорости, что и при доплеровской обработке.

Эти примеры обобщены в таблице 8.4. Параметры когерентного доплеровского измерения приведены во втором столбце таблицы. Разрешение по скорости составляет 45 м/с, а зависящая от  $S/N$  случайная доплеровская погрешность измерения скорости в столбце, как показано, составляет 5,7 м/с. При использовании нескольких измерений дальности случайная погрешность дальности, зависящая от  $S/N$ , в столбце 3 показана равной 1,9 м.

Для двух импульсов, разделенных промежутком в 1 мс, результирующая ошибка радиальной скорости составляет 2680 м/с, как показано в столбце 3. В столбце 4 показан результат при использовании 110 импульсов в течение периода в 110 мс. Тогда погрешность измерения составляет 5,7 м/с, что равно погрешности при одиночном импульсе при использовании доплеровского измерения.

Результирующая точность скорости:

$$\sigma_c = \frac{\sqrt{2} R \sigma_A}{(t_2 - t_1)} \quad 1.17$$

$$\sigma_c = \frac{\sqrt{12} R \sigma_A}{\sqrt{n} t_N} \quad 1.18$$

Таблица 1.4. Примеры измерения радиальной скорости.

ПАРАМЕТР	ДОПЛЕРОВСКАЯ СКОРОСТЬ	2 ИМПУЛЬСНЫЙ ДИАПАЗОН	МНОГОИМПУЛЬСНЫЙ ДИАПАЗОН
$\Lambda$	0.09 м	N/A	N/A
T	1 мс	N/A	N/A
$\Delta V$	45 м/с	N/A	N/A
$S/N$	15 дБ	15 дБ	15 дБ
$\Delta R$	N/A	15 м	15 м
$\sigma_{RN}$	N/A	1.9 м	1.9 м
Разделение импульсов	N/A	1 мс	N/A
Количество импульсов	N/A	2	110
PRF	N/A	N/A	1000 Гц
$t_N$	N/A	1 мс	110 мс
$\sigma_{VN}$	5.7 м/с	2680 м/с	5.7 м/с

## ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕЛИ.

### 2.1. Измерение характеристик цели радиолокационными системами.

Радар может измерять ряд характеристик цели. Такие измерения могут позволить определить класс цели или, возможно, даже тип цели. Следующие параграфы описывают несколько распространенных радиолокационных измерений:

- Целевая RCS, измеряемая по амплитуде обратного сигнала;
- Радиальная длина цели, измеряемая по длительности возвращаемого сигнала;
- Скорость вращения цели, измеряемая по доплеровскому разбросу частот возвращаемого сигнала.

Дополнительная информация о цели может быть получена на основе изменения этих измерений во времени. Интерпретация радиолокационных измерений характеристик цели - сложный процесс, который здесь рассматриваться не будет. Это не является исчерпывающим списком потенциальных измерений целевых характеристик, которые выходили бы за рамки данной книги. Целевая RCS может быть определена путем измерения

$$\sigma_s = (\sigma_{SN}^2 + \sigma_{SF}^2 + \sigma_{SB}^2)^{1/2} \quad 2.1$$

возвращаемого  $S/N$  и вычисления RCS по уравнению радара. Точность измерения RCS характеризуется среднеквадратичной погрешностью измерения  $\sigma_s$ , определяемой rss из трех компоненты ошибок.

где:

$\sigma_{SN}$  =  $S/N$ -зависимая случайная погрешность измерения RCS;

$\sigma_{SF}$  = фиксированная случайная ошибка RCS, rss радара фиксирует случайную ошибку RCS и случайную ошибку RCS от распространения;

$\sigma_{SB}$  = ошибка смещения RCS, rss ошибки смещения RCS радара и ошибка смещения RCS при распространении.

Погрешность RCS, зависящая от  $S/N$ , пропорциональна погрешности измерения принимаемой мощности. Это случайное значение со стандартным отклонением:

$$\sigma_{SN} \approx \frac{\sqrt{2} \sigma}{\sqrt{(S/N)}} \quad 2.2$$

Где  $\sigma$  в числителе относится к целевому RCS. Как и в случае ошибок измерения, рассмотренных в предыдущих разделах, в (2.2) может использоваться либо одиночный импульс, либо интегрированный сигнал/шум. Любые потери при обработке формы луча и интеграции повлияют как на значение  $S/N$ , так и на расчет RCS.

Например, при  $S/N = 20$  дБ стандартное отклонение ошибки, зависящей от  $S/N$ , составляет  $\pm 14\%$ . Если значение RCS равно  $10 \text{ м}^2$ , то стандартное отклонение составляет  $\pm 1,4 \text{ м}^2$ . Случайные фиксированные ошибки и случайные ошибки распространения обычно будут небольшими, как обсуждалось ранее. Ошибки смещения в измерениях RCS возникают, когда параметры радара, используемые для расчета RCS, точно не известны. Они могут быть значительными, если не будет соблюдена осторожность при калибровке радара. Такие ошибки смещения также могут быть уменьшены путем калибровки радара с использованием цели с известным значением RCS. Если параметры радара (например, пиковая мощность передатчика) изменяются со временем, может потребоваться частая калибровка и может возникнуть некоторое смещение RCS. Ошибки смещения RCS также могут быть вызваны ослаблением в атмосфере и во время дождя. Эти ошибки могут быть уменьшены путем оценки затухания, но точность выполнения этого может быть сомнительной, особенно при дожде. Обратите внимание, что ошибки смещения измерений RCS, вызванные некорректированным ослаблением сигнала на тракте или изменениями параметров радара, являются факторами, умножающими RCS.

Целевые RCS могут зависеть от поляризации передаваемого и принимаемого сигналов. Большинство радаров, передающих линейную поляризацию, получают линейную поляризацию с одинаковым значением, а те, которые передают круговую поляризацию, получают схему с противоположным значением.

Целевые RCS могут зависеть от поляризации передаваемого и принимаемого сигналов. Большинство радаров, передающих линейную поляризацию, получают линейную поляризацию с одинаковым значением, а те, которые передают круговую поляризацию, получают круговую поляризацию с противоположным значением. Их часто называют основными поляризациями приема. Некоторые радары также имеют возможность принимать ортогональную поляризацию либо с помощью двух приемников, либо по последовательным импульсам с помощью одного приемника. Несколько радаров также обладают возможностью передачи двух ортогональных поляризаций в последовательных импульсах. Измерения RCS, выполняемые этими радарными, могут предоставить дополнительную информацию о характеристиках цели.

Длина цели в радиальном измерении может быть измерена радаром, имеющим разрешение по дальности,  $\Delta R$ , которое меньше радиального размера цели,  $a$ . Это проиллюстрировано на рисунке 2.1 для цели, имеющей два рассеивателя, которые разрешены по дальности [рисунок 2.1(а)], и для цели, имеющей несколько рассеивателей, которые не устранены [рис. 2.1(б)]. В первом случае

$$a = R_2 - R_1 \quad 2.3$$

может быть измерена дальность действия каждого рассеивателя, и радиальная длина цели определяется их разнесением по дальности:

где нижние индексы соответствуют двум измерениям.

Точность измерения каждого диапазона определяется по формуле (1.5), а точность измерения радиальной длины  $\sigma_L$  определяется по формуле:



$$\sigma_L = (\sigma_{R1}^2 + \sigma_{R2}^2)^{1/2} \quad 2.4$$

где точность двух измерений может отличаться из-за различий в  $S/N$  для двух рассеивателей. Поскольку погрешности смещения,  $\sigma_{RB}$ , будут одинаковыми для обоих измерений, их не следует использовать при расчете погрешностей измерения диапазона.

Когда отдельные целевые рассеиватели не могут быть определены, как показано на рис. 2.1(б), точность измерения радиальной длины не может быть оценена с точностью до наоборот. Однако оно может быть аппроксимировано, используя среднее значение  $S/N$  для вычисления погрешности измерения дальности,  $\sigma_R$ .

$$\sigma_L \approx \sqrt{2}\sigma_R \quad 2.5$$

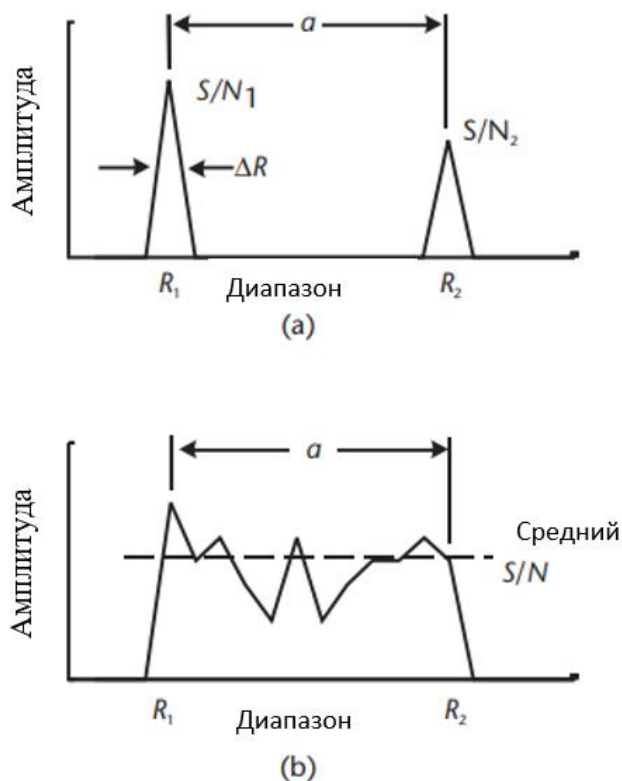


Рисунок 2.1. Сигнал цели возвращается в зависимости от дальности для сигнала радара, разрешение которого по дальности меньше радиального размера цели.

(а) Разрешенные рассеиватели. (б) Неразрешенные рассеиватели.

Разброс доплеровского сдвига частоты в сигнале, возвращаемом от цели, определяется относительными лучевыми скоростями рассеивателей цели. Это проиллюстрировано на рисунке 2.2(a) для диска или цилиндра диаметром  $a$ , имеющего рассеиватели по периферии и вращающегося с угловой скоростью  $\omega_T$ .

$$\Delta V_R = a\omega_T \sin \gamma \quad 2.6$$

Если угол между LOS радара и осью вращения цели равен  $\gamma$ , то  $\Delta V_R$  задается формулой:

Результирующий разброс целевого доплеровского сдвига частоты,  $\Delta f_D$ , проиллюстрирован на рисунке 2.2(b) и задается формулой:

Например, для цилиндрической мишени диаметром 2 м, вращающейся со

$$\Delta f_D = \frac{2a\omega_T f}{c} \sin \gamma \quad 2.7$$

скоростью 1 об/мин ( $\omega = 2\pi/60$ ) и с осью вращения 30 градусов от точки обзора радара,  $\Delta V_R = 0,105$  м/с. В диапазоне С (5,5 ГГц) результирующий разброс доплеровской частоты,  $\Delta f_D = 3,8$  Гц.

Чтобы измерить разброс доплеровского сдвига частоты,  $\Delta f_D$ , разрешение по частоте формы сигнала,  $f_R$ , должно быть меньше, чем  $\Delta f_D$ , или, что эквивалентно, разрешение по скорости формы сигнала,  $\Delta V$ , должно быть меньше, чем целевой разброс по радиальной скорости,  $\Delta V_R$ . Кроме того, если форма сигнала радара имеет неоднозначности по скорости, они должны быть разделены величиной, превышающей  $\Delta V_R$ . Точность измерения разброса

$$\sigma_F \approx \sqrt{2} \sigma_V \quad 2.7$$

доплеровской частоты  $\sigma_F$  определяется аналогично точности измерения длины сигнала. Когда рассеиватели не разрешены, это задается с помощью:

Более сложное измерение, называемое дальномерно-доплеровским отображением, включает в себя построение двумерного графика зависимости обратного сигнала от радиальной дальности и радиальной доплеровской

скорости для вращающейся цели. В каждой ячейке разрешимого диапазона отображается спектр, аналогичный этому сгенерировано изображение, показанное на рисунке 2.2(b). Положение рассеивателей в этом спектре соответствует их расположению на мишени. Целевые рассеиватели на этом графике могут быть интерпретированы как целевое изображение в измерениях диапазона и поперечного сечения. Для определения конфигурации вращающихся объектов может быть использована дальнедействующая доплеровская томография. Он также может быть использован на стационарных объектах, когда вращение LOS создается движущимся радаром.

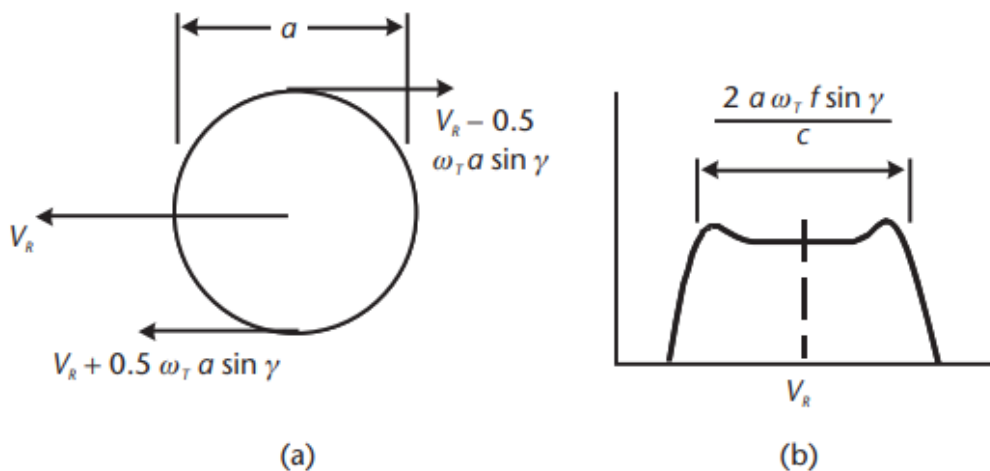


Рис. 2.2 Геометрия вращения мишени и результирующий доплеровский частотный спектр. (a) Вращательная геометрия. (b) Спектр.

## 2.2. Мультирадарные измерения

Использование двух или более радаров для измерения характеристик цели может дать ряд преимуществ. К ним относятся:

- Повышенная точность определения местоположения и скорости за счет использования многодиапазонных измерений и измерений радиальной скорости для уменьшения ошибок измерения на разных расстояниях.;
- Измерение целевых характеристик с разных углов обзора и с разной частотой;

- Расширенные возможности для определения выгодного местоположения, геометрии измерений и частоты радара для проведения радиолокационных измерений.

Улучшения точности, обеспечиваемые первым пунктом выше, рассматриваются в этом разделе.

Последние два фактора зависят от деталей системного приложения.

В большинстве импульсных радаров точность определения дальности значительно выше, чем точность определения поперечной дальности (угловая точность, умноженная на дальность до цели). Аналогичным образом, точность определения радиальной скорости значительно выше, чем точность определения скорости в поперечном диапазоне. Когда два или более радара наблюдают за целью, их измерения дальности могут быть объединены для значительного повышения общей точности измерения местоположения и скорости. Этот метод иногда называют мультилатерацией.

Это проиллюстрировано на рисунке 2.3, на котором показаны два радара, наблюдающих цель с помощью LOS, которые разделены углом  $\alpha$ . Погрешности измерения дальности двух радаров составляют  $\sigma_{R1}$  и  $\sigma_{R2}$ . Ошибки в пересечении дальностей велики, поэтому неопределенность положения цели для каждого радара показана параллельными линиями. Погрешность измерения положения в плоскости, определяемой радаром, и цели показана на рисунке. Максимальная

$$\sigma_{PD} \approx \frac{\sigma_R}{\sin \alpha} \quad 2.8$$

погрешность измерения положения в этой плоскости,  $\sigma_{PD}$ , приблизительно определяется по формуле:

где  $\sigma_R$  - наибольшая из двух погрешностей измерения диапазона.

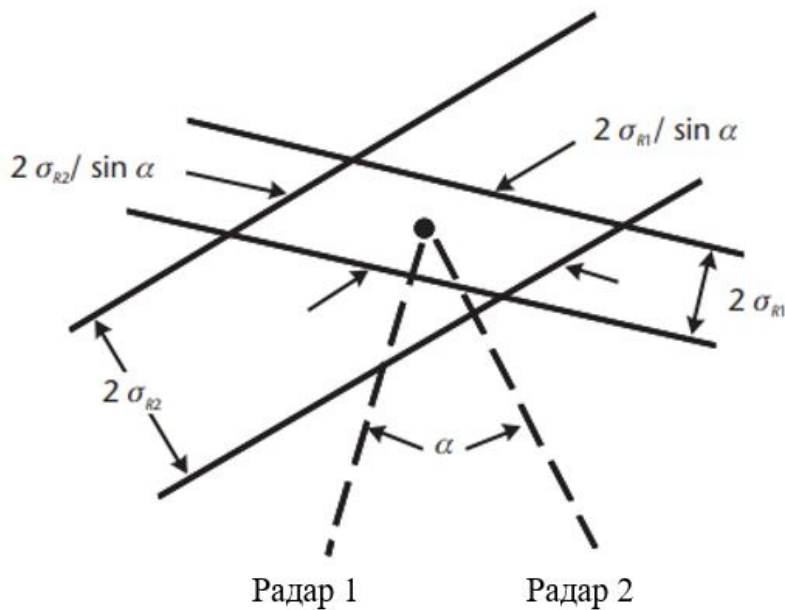


Рисунок 2.3 Геометрия для определения местоположения цели с использованием измерений дальности двумя радарными.

Для наиболее благоприятной геометрии  $\alpha = 90^\circ$  и  $\sigma_{PD} = \sigma_R$ . Когда  $\alpha$  меньше  $90^\circ$ , погрешность измерения увеличивается. Это иногда называют геометрическим снижением точности (GDOP). Когда  $\alpha$  приближается к нулю, использование двух радаров больше не имеет смысла. Тогда погрешность из (2.8) становится очень большой, и точность поперечной дальности определяется погрешностью измерения угла радара.

Аналогичный результат получается при измерении скорости цели в плоскости, определяемой радарными и целью. Максимальная погрешность определения

$$\sigma_{VD} \approx \frac{\sigma_V}{\sin \alpha} \quad 2.9$$

скорости цели в плоскости,  $\sigma_{VD}$ , приблизительно определяется по формуле:

где  $\sigma_V$  - большая из двух ошибок измерения радиальной скорости.

Например, если два радара наблюдают цель с углами обзора, отличающимися на 45 градусов, и имеют точность измерения дальности 1,5 м и 3,0 м,

результатирующая максимальная ошибка определения местоположения в плоскости радаров и цели составляет приблизительно 4,2 м. Если две точности измерения радиальной скорости равны 5 м/с и 2 м/с, то результирующая погрешность измерения радиальной скорости составляет приблизительно 7,1 м/с.

Уменьшение погрешности измерения, описанное выше, происходит в плоскости, определяемой целью и радаром. Добавление радаров в этой плоскости может еще больше уменьшить погрешности измерений в этой плоскости, но не повлияет на ошибки пересечения дальности вне плоскости. Часто примерно так обстоит дело с несколькими наземными радаром, наблюдающими за наземными или маловысотными воздушными целями. Уменьшение ошибок, связанных с отклонением от плоскости

использование этого метода требует добавления одного или нескольких радаров на значительном удалении от плоскости, определяемой другими радаром и целью. Точность, обеспечиваемая ими, может быть проанализирована путем определения других плоскостей, содержащих два или более радаров, и цели.

В предыдущих анализах предполагалось, что радиолокационные измерения производятся одновременно или что цель является стационарной. Это требование может быть смягчено, когда радиолокационные измерения сглаживаются или обрабатываются в фильтре слежения, как описано в следующем разделе.

При некоторых обстоятельствах один радар может быть использован для обеспечения преимуществ мультилатерации. Например, радар, пролетающий мимо неподвижной наземной цели, может обеспечивать многоступенчатые измерения. Аналогичным образом, стационарный радар может обеспечивать многократные измерения цели, пролетающей мимо радаров. В этом последнем случае характеристики траектории цели должны быть известны (или оценены) для правильного объединения радиолокационных измерений. Этот метод может

быть использован для целей, которые, как предполагается, летят по прямым траекториям, а также для ракет и спутников, летящих по баллистическим траекториям.

Использование нескольких радаров для измерения цели предполагает, что измерения на цели с помощью нескольких радаров могут быть правильно связаны с этой целью. Обычно это возможно, когда в луче каждого радара находится одна цель. Когда в луче радара находится несколько целей, могут возникать неправильные ассоциации измерений и могут генерироваться цели-призраки. Это аналогично проблеме появления призраков при пассивном отслеживании.

### 2.3. Сглаживание измерений и отслеживание.

Данные радиолокационных измерений могут быть сглажены для повышения точности измерений, оценки параметров траектории цели и прогнозирования будущего положения цели. Объединение двух или более измерений для определения радиальной скорости и скорости в поперечном направлении обсуждается в разделе 1.4, а результирующая точность измерений приведена в (формула 1.15)- (формула 1.18).

Случайные составляющие измерений местоположения радара могут быть уменьшены путем усреднения измерений. Например, когда объединяются измерения  $n$  диапазонов, результирующая сглаженная погрешность диапазона:

$$\sigma_{RS} = \left( \frac{\sigma_{RN}^2 + \sigma_{RF}^2}{n} + \sigma_{RB}^2 \right)^{1/2} \quad 2.10$$

Случайная ошибка, зависящая от  $S/N$ , и случайная ошибка фиксированного диапазона уменьшаются на  $n^{1/2}$ . Ошибка смещения не уменьшается при сглаживании. Это не следует включать в расчет, когда рассматриваются измерения относительной дальности, как описано в Разделе 1.2. Обратите внимание, что погрешности измерений из-за помех радара могут быть

независимыми от измерения к измерению и, следовательно, не могут быть уменьшены на  $n^{1/2}$ .

Для примера, приведенного в разделе 8.1, если усреднить 20 измерений дальности, зависящая от  $S/N$  случайная погрешность дальности уменьшается с 18,9 м до 4,2 м, а фиксированная случайная погрешность измерения дальности уменьшена с 3 м до 0,7 м. Результирующая точность измерения дальности по (8.29) составляет 10,9 м по сравнению с 21,6 м без сглаживания. Видно, что в сглаженной погрешности измерения преобладает погрешность смещения в 10 м, которая не уменьшается при сглаживании. Если этот параметр смещения не включен, то погрешность измерения со сглаживанием составляет 4,3 м.

Сглаженная угловая погрешность измерения  $\sigma_{AS}$  аналогично определяется по формуле:

$$\sigma_{AS} = \left( \frac{\sigma_{AN}^2 + \sigma_{AF}^2}{n} + \sigma_{AB}^2 \right)^{1/2} \quad 2.11$$

Будущее положение цели может быть предсказано на основе измерений положения и скорости.

Для времени прогнозирования,  $t_p$ , точность прогнозируемого положения в диапазоне,  $\sigma_{PR}$ , и положения в поперечном диапазоне,  $\sigma_{PC}$ , задаются формулой:

$$\sigma_{PR} = \left[ \sigma_R^2 + (\sigma_V t_P)^2 \right]^{1/2} \quad 2.12$$

$$\sigma_{PC} = \left[ (R\sigma_A)^2 + (\sigma_C t_P)^2 \right]^{1/2} \quad 2.13$$

Уравнения (2.12) и (2.13) предполагают, что скорость цели остается постоянной в течение времени прогнозирования и что геометрия наблюдения существенно не меняется в течение этого времени. Поэтому они действительны только в течение относительно коротких периодов прогнозирования. В течение более длительных периодов времени потери для цели могут изменяться, так что в



направлении дальности появляется составляющая ошибки прогнозирования для разных диапазонов.

При длительном времени прогнозирования предсказанная ошибка, обусловленная измерением скорости [второй член в формулах (2.12) и (2.13)], обычно доминирует над точностью прогнозирования, а ошибки, обусловленные ошибками измерения угла, обычно намного превышают ошибки измерения

$$\sigma_P \approx \sigma_C t_P = \frac{\sqrt{12} R \sigma_A t_P}{\sqrt{n} t_N} \quad 2.14$$

дальности. Наибольшая полуось эллипсоида ошибки прогнозируемого положения цели,  $\sigma_P$ , затем задается приблизительно по формуле:

где  $\sigma_C$  и  $\sigma_A$  - наибольшая из двух погрешностей измерения поперечного диапазона и угла соответственно. Когда целевая скорость остается постоянной, (формула 2.14) может использоваться для длительного прогнозирования. Он также может быть использован для прогнозирования ошибок определения местоположения орбитальных целей, траектории полета которых следуют законам Кеплера, но с меньшей точностью из-за влияния орбитальной механики на форму и ориентацию эллипсоида ошибки.

Для примера измерения угла, приведенного в разделе 1.2, погрешность по азимуту (исключая погрешность смещения) составляет 2 мрад. Предполагая, что эта ошибка больше, чем ошибка по высоте, если угловая скорость измеряется 30 импульсами с частотой 10 Гц в течение 3 секунд на дальности до цели 100 км, прогнозируемая ошибка определения местоположения цели за время прогнозирования в 50 секунд составляет 2,11 км.

Предыдущее обсуждение касалось неуправляемых целей. К ним относятся самолеты с прямолинейными, горизонтальными траекториями полета и постоянной скоростью, а также внеатмосферные

объекты на кеплеровских орбитах. Измерения на таких мишенях могут быть сглажены в течение длительных периодов времени, чтобы уменьшить случайные составляющие погрешности, о чем свидетельствует

(2.10) и (2.11), и их положение может быть предсказано далеко в будущем, как указано в (2.14). Многие другие цели могут совершать случайные маневры или другие ускорения. Время сглаживания измерений и прогнозирования для этих целей ограничено их характеристиками ускорения.

Фильтры слежения обычно используются для сглаживания результатов измерений и прогнозирования будущих положений маневрирующих целей. Простые фильтры отслеживания используют фиксированные коэффициенты сглаживания. Фильтр  $\alpha$ - $\beta$  использует параметр  $\alpha$  для сглаживания положения цели и параметр  $\beta$  для сглаживания скорости цели. Значения этих параметров представляют собой компромисс между обеспечением хорошего сглаживания для уменьшения случайных ошибок измерений и обеспечением быстрого реагирования на маневры цели. Целевое ускорение может привести к ошибке динамического запаздывания в таких фильтрах, которая в некоторых случаях может преобладать над общей ошибкой. Некоторые такие фильтры добавляют третий параметр,  $\gamma$ , для сглаживания целевого ускорения.

В фильтрах Калмана радиолокационные измерения сопоставляются с моделью ошибок измерений и динамики цели. Если они будут точно смоделированы, фильтр Калмана сведет к минимуму среднеквадратичную погрешность измерения. Фильтры Калмана несколько сложнее в реализации, чем фильтры с фиксированными параметрами, но они широко используются в современных радиолокаторах из-за их возможностей справляться с отсутствующими данными, переменным шумом измерений и переменной динамикой цели. Радары, такие как антенные радары слежения, непрерывно наблюдают за целью и обеспечивают измерения с высокой скоростью передачи данных. Другие радары могут быть ограничены в скорости измерения, которую они обеспечивают на цели. Например, вращающиеся поисковые радары работают в

режиме отслеживания во время сканирования (TWS), описанном ниже, и генерируют измерение в течение каждого периода вращения. Такой низкая частота измерений может ограничить точность, обеспечиваемую фильтром слежения за маневрирующими целями.

Многофункциональные радары с фазированной антенной решеткой могут ограничивать частоту измерений для отслеживания нескольких целей или выполнения других функций радара. Однако скорость слежения должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить требуемую точность слежения для маневрирующих целей и гарантировать, что радар не потеряет след цели в промежутках между наблюдениями. Радары с фазированной антенной решеткой обычно освещают прогнозируемое местоположение цели лучом. Для успешного отслеживания цель должна большую часть времени находиться в пределах этого луча.

Ошибка в прогнозировании положения цели приблизительно определяется rss ошибки прогнозирования цели на большой дальности, приведенной в (2.13), и ошибкой, вызванной маневром цели. Для максимального ускорения цели, равного  $a_T$ , ошибка в прогнозировании положения цели из-за маневра,  $\sigma_M$ , определяется по формуле:

$$\sigma_M = \frac{a_T t_P^2}{2} \quad 2.15$$

Чтобы гарантировать, что прогнозируемое положение цели находится в пределах луча радара для большинства наблюдений, значение общей ошибки прогнозирования  $3\text{-}\sigma$  должно составлять менее половины ширины луча:

$$\left[ (\sigma_C t_P)^2 + \left( \frac{a_T t_P^2}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \leq \frac{R\theta}{6} \quad 2.16$$

Когда радар отслеживает несколько целей, важно, чтобы новые измерения были связаны с правильным отслеживанием цели. Это часто делается с использованием назначения новых измерений ближайшему соседу. Однако для близко расположенных целей иногда используется метод, который включает в себя все наблюдения за целью вблизи заданного положения цели. Сопоставление целевых показателей может быть улучшено путем увеличения частоты измерений выше той, которая необходима для отслеживания одной цели.

#### **2.4. Методы радиолокационного слежения.**

Для реализации слежения в радиолокационных системах используется множество методов. В ранних вращающихся радарах наблюдения положения целей при последовательном сканировании отмечались на дисплее РРІ, и эти положения связывались. Позже цифровая обработка обеспечила автоматическое измерение положения цели и расчет курса и скорости цели. Такие методы называются отслеживанием во время сканирования (TWS).

Антенные радары слежения обычно используют метод измерения для определения смещения цели от центра луча.

К ним относятся:

- Последовательное развертывание, при котором последовательные лучи передаются и принимаются с небольшим смещением по углу от основного луча;
- Коническое сканирование, при котором антенна сканирует небольшой конус вокруг целевого положения;
- Моноимпульсное измерение, при котором угловое положение цели измеряется одним импульсом с использованием разностных диаграмм направленности антенн.

Сервопривод используется для направления и поддержания антенны направленной в направлении цели. Параметры фильтра углового слежения встроены в контур сервоуправления.

Радары с фазированной антенной решеткой часто отслеживают множество целей одновременно и обладают большой гибкостью при определении времени проведения измерений слежения. Эти радары обычно используют моноимпульсные угловые измерения. Фильтр слежения реализован в цифровом компьютере, который также управляет процессом радиолокационных измерений. Многие такие радары используют рекурсивные фильтры Калмана для отслеживания, но другие собирают радарные данные и используют пакетную обработку.

Когда несколько радаров в системе наблюдают за целью, фильтр слежения может использовать данные измерений более чем с одного радара. Это может обеспечить преимущества мультилатерации, а также более частое обновление трека и возможность более благоприятной геометрии измерений.

## ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЧЕРЕЗ VBA SOFTWARE.

### 3.1. Измерение точности измерения диапазона через vba soft.

Назначение: Вычисляет стандартное отклонение погрешности измерения дальности действия радара.

Исходные уравнения (1.5), (1.6) и (2.10).

Функции сочетают вычисленную ошибку случайного диапазона, зависящую от  $S / N$ , с фиксированной

ошибкой случайного диапазона и ошибкой смещения диапазона. Ошибка смещения диапазона может быть опущена для вычисления относительной ошибки диапазона. Может быть смоделировано сглаживание случайных составляющих погрешности по нескольким измерениям.

Входные параметры (с указанными единицами измерения)

**RangeRes\_m** = разрешение радара по дальности действия (м). Может использоваться значение  $1/B$ , где  $B$  - полоса пропускания радиолокационного сигнала.

**SNR\_dB** = значение  $S/N$  измерения (дБ). Это может быть одноимпульсный сигнал  $S/N$  или интегрированный сигнал  $S/N$ , в зависимости от обстоятельств.

Вводимое значение должно учитывать

любые потери формы луча или дополнительные потери при обработке сигнала для интегрирования импульсов.

При значениях  $S/N$  для одиночных импульсов менее примерно 12 дБ следует также учитывать потери при обнаружении.

**RangeFixEr\_m** = составная фиксированная случайная ошибка диапазона (м). Этот параметр представляет собой rss-код фиксированной случайной ошибки

дальности действия радара и любых случайных ошибок дальности, вызванных распространением и другими источниками.

**RangeBiasEr\_m** (необязательно) = ошибка смещения составного диапазона (м). Этот параметр это rss ошибки смещения дальности радара и любых ошибок смещения дальности, вызванных распространением и другими источниками. Если оставить поле пустым, то для этого параметра будет принято нулевое значение.

**N\_Smooth\_Integer** (необязательно) = количество измерений диапазона, которые сглаживаются с точностью до рассчитанного диапазона (целое число). Если оставить это поле пустым, то будет приниматься измерение по одному импульсу или по одной интегрированной группе импульсов.

Выходные данные не генерируются для значений меньше 1.

Функция выводит стандартное отклонение погрешности измерения диапазона для указанных параметров (м).

Поле параметров аргументов функции Excel для диапазона функций **Error\_m** показано на рисунке 3.1 с примерами параметров и решением

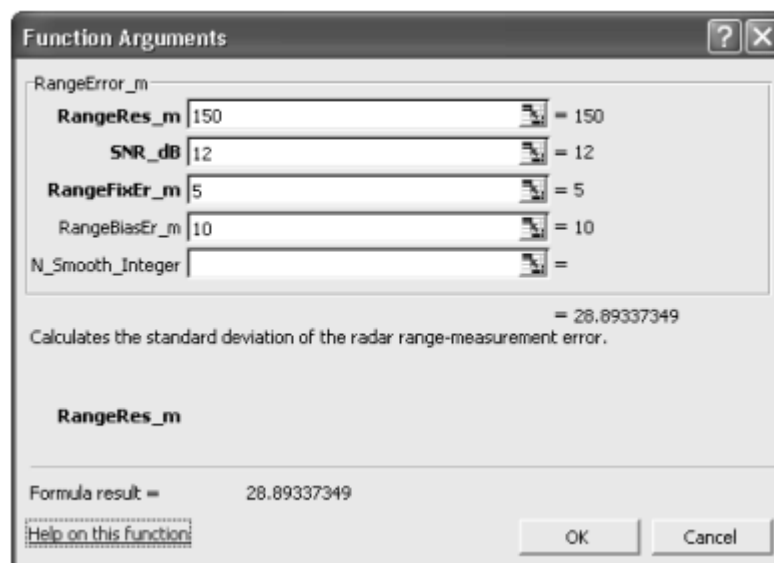


Рисунок 3.1 Поле параметров Excel для диапазона функций Error\_m.

### 3.2. Измерение точности углового измерения через vba soft.

Назначение: Вычисляет стандартное отклонение погрешности измерения угла радиолокатора.

Исходные уравнения (1.7), (1.8), (1.9), и (2.11).

Функции сочетают вычисленную случайную угловую ошибку, зависящую от  $S/N$ , с фиксированной случайной угловой ошибкой и ошибкой смещения угла. Предполагается моноимпульсное измерение с разностным наклоном  $kM = 1,6$ . Ошибка углового смещения может быть опущена для вычисления относительной угловой ошибки. Позволяет моделировать уширение луча фазированной антенной решетки и зависящие от угла сканирования фиксированные случайные ошибки и ошибки угла смещения. Может быть смоделировано сглаживание случайных составляющих погрешности по нескольким измерениям.

Входные параметры (с указанными единицами измерения)

**Beamwidth\_mr** = ширина луча антенны радара на широкой стороне решетки в координате измерения угла (мрад).

**SNR\_dB** = значение  $S/N$  измерения (дБ). Это может быть одноимпульсный сигнал  $S/N$  или интегрированный сигнал  $S/N$ , в зависимости от обстоятельств. Вводимое значение должно учитывать любые потери формы луча или дополнительные потери при обработке сигнала для интегрирования импульсов. При значениях  $S/N$  для одиночных импульсов менее примерно 12 дБ следует также учитывать потери при обнаружении.

**AngleFixEr\_mR** = составная фиксированная случайная угловая ошибка в координате измерения (мрад). Этот параметр представляет собой rss-код фиксированной случайной угловой ошибки радара и любых случайных угловых ошибок, вызванных распространением и другими источниками.



**ScanAngle\_deg** (необязательно) = угол сканирования для фазированных решеток в координатах измерения (градусы).

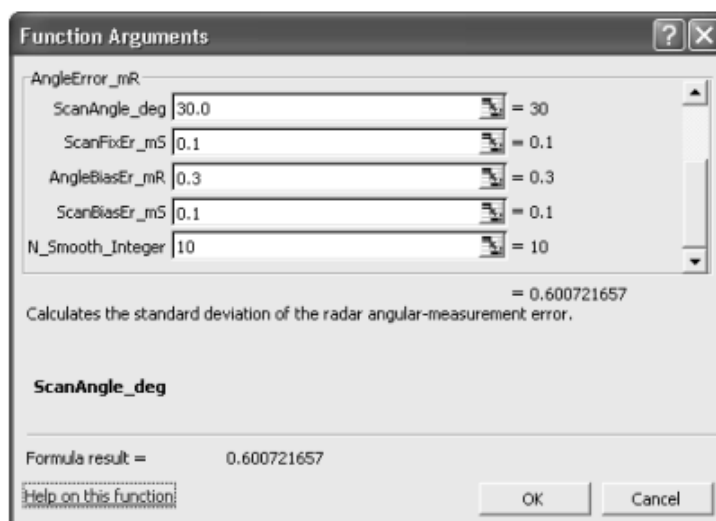
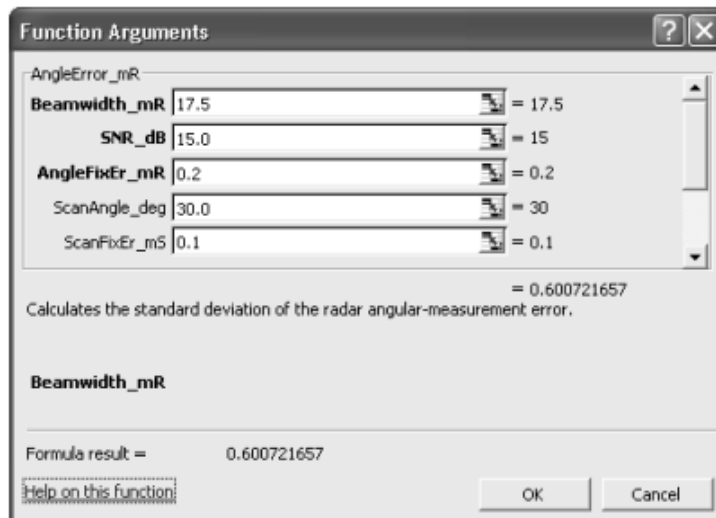


Рисунок 3.2 Поле параметров Excel для функции Angle Error\_mR.

**ScanFixEr\_mS** (необязательно) = зависящая от угла сканирования случайная угловая ошибка радара в координате измерения для фазированных решеток (мсин). Если этот параметр опущен, то будет приниматься нулевое значение.

**AngleBiasEr\_mR** (необязательно) = суммарная ошибка смещения угла в координате измерения (мрад). Этот параметр представляет собой rss ошибки смещения угла радара в координате измерения и любых ошибок смещения угла, вызванных распространением и другими источниками. Если оставить поле пустым, то для этого параметра будет принято нулевое значение.

**ScanBiasEr\_mS** (необязательно) = зависящая от угла сканирования ошибка смещения угла радара в координате измерения для фазированных решеток (мсин) Если оставить это поле пустым, для этого параметра будет принято нулевое значение.

**N\_Smooth\_Integer** (необязательно) = количество измерений угла, которые сглаживаются с точностью вычисленного угла (целое число). Если оставить это поле пустым, то будет предполагаться измерение одиночного импульса или интегрированной группы импульсов. Выходные данные не генерируются для значений меньше 1.

Функция выводит стандартное отклонение угловой погрешности измерения для заданных параметров (мрад). Поле параметров аргументов функции Excel для функции **AngleError\_mR** показано на рисунке 3.2 с примерами параметров.

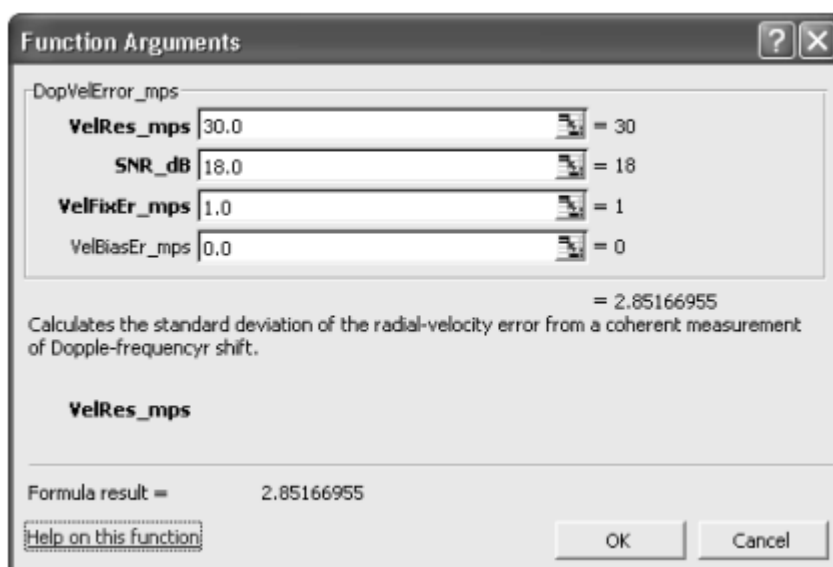


Рисунок 3.3 Поле параметров Excel для функции Angle Error\_mR.

### 3.3. Измерение точности измерения доплеровской скорости через vba soft.

Цель: Вычисляет стандартное отклонение ошибки измерения радиальной скорости радара от когерентного измерения доплеровского сдвига частоты.

Исходные уравнения (1.12) и (1.13).

Функции сочетают вычисленную случайную погрешность радиальной скорости, зависящую от  $S / N$ , с фиксированной случайной погрешностью радиальной скорости и погрешностью смещения радиальной скорости. Ошибка смещения радиальной скорости может быть опущена для вычисления относительной ошибки радиальной скорости.

Входные параметры (с указанными единицами измерения)

**VelRes\_mps** = разрешение радара по радиальной скорости (м/с). Может использоваться значение  $\lambda/2\tau$ , где  $\lambda$  - длина волны радиолокационного сигнала, а  $\tau$  - длительность когерентно обработанного сигнала.

**SNR\_dB** = значение  $S/N$  измерения (дБ). Это может быть одноимпульсный сигнал  $S/N$  или интегрированный сигнал  $S/N$ , в зависимости от обстоятельств. Вводимое значение должно учитывать любые потери формы луча или дополнительные потери при обработке сигнала для интегрирования импульсов. При значениях  $S/N$  для одиночных импульсов менее примерно 12 дБ следует также учитывать потери при обнаружении.

**VelFixEr\_mps** = составная фиксированная случайная ошибка радиальной скорости (м/с). Этот параметр представляет собой rss фиксированной случайной ошибки радиальной скорости радара и любых случайных ошибок радиальной скорости, вызванных распространением и другими источниками.

**VelBiasEr\_mps** (необязательно) = суммарная ошибка смещения радиальной скорости (м/с). Этот параметр представляет собой rss ошибки смещения радиальной скорости радара и любых ошибок смещения радиальной скорости, вызванных распространением и другими источниками. Если оставить поле пустым, то для этого параметра будет принято нулевое значение. Функция выводит стандартное отклонение погрешности измерения лучевой скорости из когерентного измерения доплеровского сдвига частоты для указанных параметров (м/с).

Поле параметров аргументов функции Excel для функции DopVelError\_mps показано на рисунке 3.3 с примерами параметров и решением.

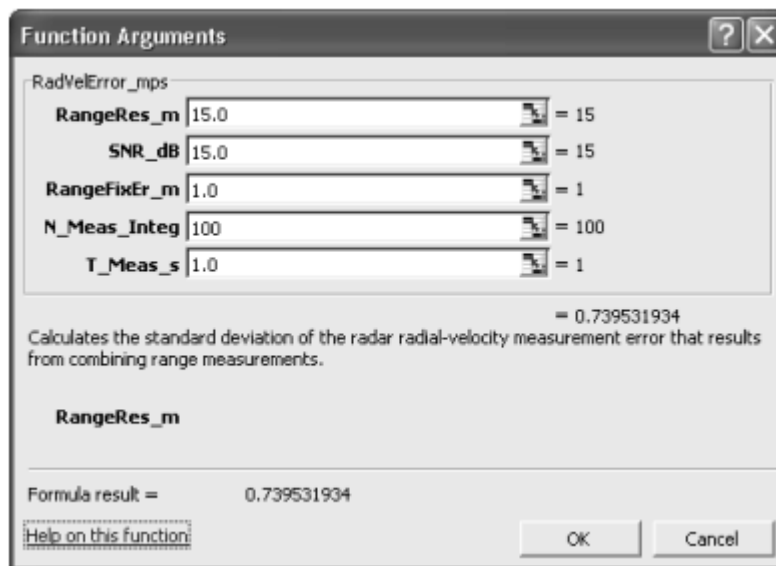


Рисунок 3.4 Поле параметров Excel для функции RadVelError\_mps.

### 3.4. Функция radvelerror\_mps

Цель: Вычисляет стандартное отклонение погрешности измерения радиальной скорости радара, возникающей в результате комбинирования измерений дальности.

Исходные уравнения (1.15) и (1.16).

Функции Вычисляют погрешность измерения дальности на основе входных параметров погрешности измерения дальности радара. Вычисляет погрешность радиальной скорости либо по разнице двух измерений дальности, либо по результатам обработки последовательности из шести или более измерений дальности.

Входные параметры (с указанными единицами измерения)

**RangeRes\_m** = разрешение радара по дальности действия (м). Может использоваться значение  $1/B$ , где  $B$  - ширина полосы радиолокационного сигнала.

**SNR\_dB** = диапазон измерения  $S/N$  (дБ). Это может быть одноимпульсный сигнал  $S/N$  или интегрированный сигнал  $S/N$ , в зависимости от обстоятельств.

Вводимое значение должно учитывать любые потери формы луча или дополнительные потери при обработке сигнала для интегрирования импульсов.

При значениях  $S/N$  для одиночных импульсов менее примерно 12 дБ следует также учитывать потери при обнаружении.

**RangeFixEr\_m** = составная фиксированная случайная погрешность измерения дальности (м). Этот параметр представляет собой rss-код фиксированной случайной ошибки дальности действия радара и любых случайных ошибок дальности, вызванных распространением и другими источниками.

**N\_Meas\_Integer** = количество измерений дальности, используемых при измерении лучевой скорости (целое число). Если вводится значение от 2 до 5, то используется (1.15). Если вводится значение 6 или больше, используется значение (1.16). При входных значениях меньше 2 результат не выдается, что обозначается выходным значением -1.

**T\_Meas\_s** = продолжительность измерений (сек). Для двух измерений это временное разделение измерений. Для последовательности импульсов это длительность используемой последовательности импульсов.

Функция выводит стандартное отклонение погрешности измерения лучевой скорости при объединении измерений дальности для указанных параметров (м/с).

Поле параметров аргументов функции Excel для функции RadVelError\_mps показано на рисунке 3.5 с примерами параметров и решением.

### 3.5 Функция crossvelerror\_mps

Цель: Вычисляет стандартное отклонение погрешности измерения скорости в поперечном диапазоне радара, возникающей в результате комбинирования измерений угла.

Исходные уравнения (1.17) и (1.18).

Функции Вычисляют погрешность измерения угла на основе входных параметров ошибки определения угла радара. Вычисляет ошибку скорости в поперечном диапазоне либо на основе разницы двух измерений угла, либо на основе обработки последовательности измерений угла с использованием указанного целевого диапазона. Предполагается значение  $kM = 1,6$ .

Позволяет моделировать уширение луча фазированной антенной решетки и ошибки, зависящие от сканирования.

Входные параметры (с указанными единицами измерения)

Ширина луча  $_{mr}$  = ширина луча антенны радара на широкой стороне решетки в координатах измерения поперечного диапазона (мрад).

**SNR\_dB** = измерение угла  $S/N$  (дБ). Это может быть одноимпульсный сигнал  $S/N$  или интегрированный сигнал  $S/N$ , в зависимости от обстоятельств. Вводимое значение должно учитывать любые потери формы луча или дополнительные потери при обработке сигнала для интегрирования импульсов.

При значениях  $S/N$  для одиночных импульсов менее примерно 12 дБ следует также учитывать потери при обнаружении.

**AngleFixEr\_mR** = составная фиксированная случайная угловая ошибка в координате измерения (мрад). Этот параметр представляет собой rss-код фиксированной случайной угловой ошибки радара и любых случайных угловых ошибок, вызванных распространением и другими источниками.

**TgtRange\_km** = дальность до цели (км).

**N\_Meas\_Integer** = количество измерений угла, используемых при измерении скорости в поперечном диапазоне (целое число). Если вводится значение от 2 до 5, то используется (1.17). Если введено значение 6 или больше, то используется (1.18). При входных значениях меньше 2 результат не выдается, что обозначается выходным значением -1.

**T\_Meas\_s** = продолжительность измерений (сек). Для 2 измерений это временное разделение измерений. Для последовательности импульсов это длительность

используемой последовательности импульсов.

**ScanAngle\_deg** (необязательно) = угол сканирования в координате измерения для фазированных решеток (градусы). Если этот параметр опущен, то будет приниматься нулевое значение.

**ScanFixEr\_mS** (необязательно) = зависящая от угла сканирования случайная угловая ошибка радара в координате измерения для фазированных решеток (мсин). Если этот параметр опущен, то будет приниматься нулевое значение.

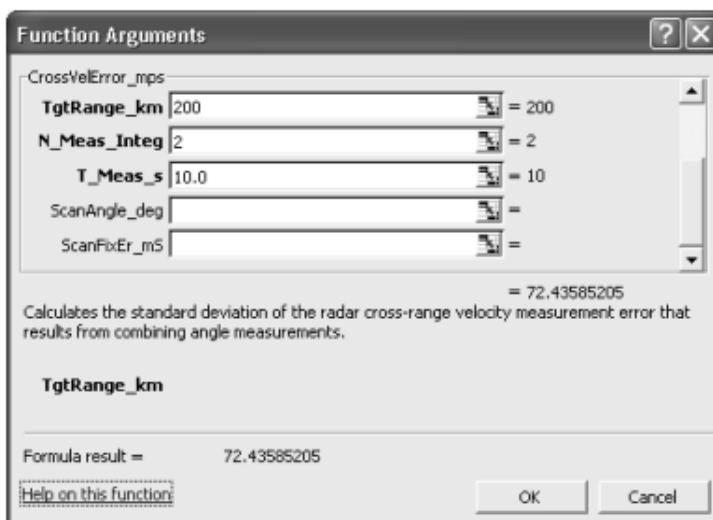
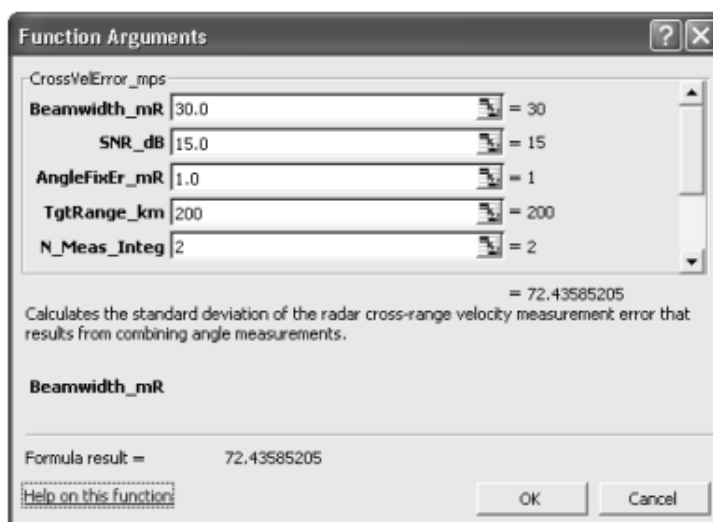


Рисунок 3.5 Поле параметров Excel для функции CrossVel Error\_mps.

### 3.6 Функция `predict_error_km`

Цель: Вычисляет приблизительное стандартное отклонение ошибки в прогнозируемом местоположении по результатам радиолокационных измерений для неманеврирующих целей.

Исходные уравнения (1.7)- (1.9), (8.30) и (8.33).

Вычисляет погрешность измерения угла на основе входных данных параметра угловой ошибки радара. Вычисляет ошибку скорости в поперечном диапазоне на основе обработки последовательности измерений углов и заданной дальности до цели. Вычисляет ошибку прогнозируемого местоположения на основе ошибки скорости в поперечном диапазоне и заданного времени прогнозирования. Координата поперечного диапазона, имеющая большую погрешность измерения (ширина луча), должна быть используется для получения полуоси с наибольшей ошибкой прогнозируемого положения. Предполагается значение  $kM = 1,6$ . Позволяет моделировать уширение луча фазированной антенной решетки и ошибки, зависящие от сканирования.

Входные параметры (с указанными единицами измерения)

**Bandwith\_mr** = ширина луча антенны радара на широкой стороне решетки в координатах измерения поперечного диапазона (мрад).

**SNR\_dB** = измерение угла  $S/N$  (дБ). Это может быть одноимпульсный сигнал  $S/N$  или интегрированный сигнал  $S/N$ , в зависимости от обстоятельств. Вводимое значение должно учитывать любые потери формы луча или дополнительные потери при обработке сигнала для интегрирования импульсов. При значениях  $S/N$  для одиночных импульсов менее примерно 12 дБ следует также учитывать потери при обнаружении (5.16).

**AngleFixEr\_mR** = составная фиксированная случайная угловая ошибка в координате измерения (мрад). Этот параметр представляет собой rss-код фиксированной случайной угловой ошибки радара и любых случайных угловых ошибок, вызванных распространением и другими источниками.



**TgtRange\_km** = дальность до цели (км).

**N\_Meas\_Integer** = количество измерений дальности в последовательности импульсов, используемых для измерения скорости в поперечном диапазоне (целое число). При вводе значения меньше 2 результат не выдается, что обозначается значением -1 на выходе.

**T\_Meas\_s** = длительность последовательности импульсов, используемой для измерения скорости на разных расстояниях (сек).

**T\_Predict\_s** = время после измерения скорости в поперечном диапазоне, за которое вычисляется ошибка прогнозирования (сек).

**ScanAngle\_deg** (необязательно) = угол сканирования в координате измерения для фазированных решеток (градусы). Если этот параметр опущен, то будет приниматься нулевое значение.

**ScanFixEr\_mS** (необязательно) = Зависящая от угла сканирования случайная угловая ошибка радара в координате измерения для фазированных решеток (мсин). Если этот параметр опущен, то будет приниматься нулевое значение.

Функция выводит среднеквадратичное отклонение прогнозируемой ошибки определения местоположения в координатах измерения поперечной скорости (км).

Вычисляет погрешность измерения угла на основе входных данных параметра угловой ошибки радара. Вычисляет ошибку скорости в поперечном диапазоне на основе обработки последовательности измерений углов и заданной дальности до цели. Вычисляет ошибку прогнозируемого местоположения на основе ошибки скорости в поперечном диапазоне и заданного времени прогнозирования. Координата поперечного диапазона, имеющая большую погрешность измерения (ширина луча), должна быть используется для получения полуоси с наибольшей ошибкой прогнозируемого положения. Предполагается значение  $kM = 1,6$ .

Позволяет моделировать уширение луча фазированной антенной решетки и ошибки, зависящие от сканирования.

Поле параметров аргументов функции Excel для функции Predict Error\_km показано на рисунке 3.6 с примерами параметров и решением.

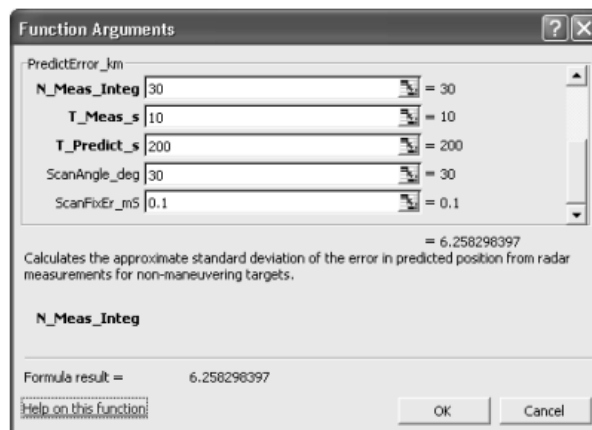
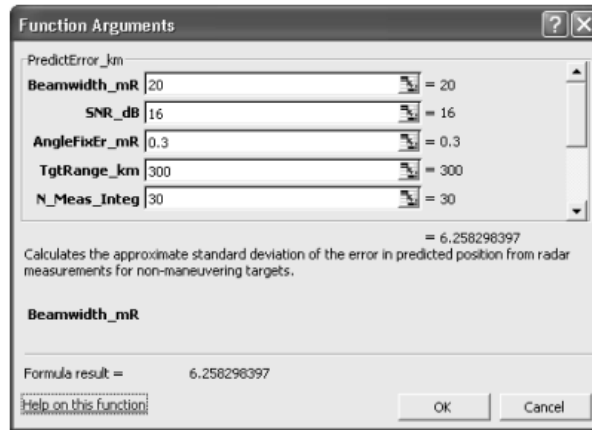


Рисунок 3.6 Поле параметров Excel для функции Predict Error\_km.

## ГЛАВА 4. ВЫЧИСЛЕНИЕ

### 4.1. Задача 1

Радар имеет разрешение по дальности 15 м (полоса пропускания = 10 МГц), фиксированную случайную погрешность по дальности 1 м и ошибку смещения по дальности 5 м. Если  $S/N = 18$  дБ, то каковы стандартные отклонения относительной и абсолютной погрешностей диапазона? Каковы значения 3- $\sigma$  этих ошибок? Что такое абсолют 3- $\sigma$ ? Какова абсолютная погрешность измерения диапазона в 3  $\sigma$ , если для выполнения измерения сглаживается 50 импульсов?

**Дано:**

- Разрешение по дальности = 15 м
- Полоса пропускания = 10 МГц
- Исправлена ошибка случайного диапазона = 1 м
- Погрешность смещения диапазона = 5 м
- $S/N = 18$  дБ
- Количество импульсов ( $N$ ), используемых для сглаживания = 50

**Чтобы рассчитать:**

- Стандартное отклонение относительной погрешности диапазона
- Стандартное отклонение абсолютной погрешности диапазона
- 3- $\sigma$  значения относительной и абсолютной погрешностей диапазона
- абсолютный диапазон 3- $\sigma$  - погрешность измерения для 50 сглаженных импульсов

**Решение:**

Полоса пропускания радиолокационной системы,  $\Delta f = c\lambda / (2\Delta r)$

где  $c$  - скорость света,  $\lambda$  - длина волны, а  $\Delta r$  - разрешение по дальности.

$$\lambda = c / f = c / (2 * \Delta f) = 0,03 \text{ м (прибл.)}$$

$$\text{Относительная погрешность диапазона} = \Delta r / R = \lambda / 2\pi$$

где R - дальность до цели.

$$\text{Относительное стандартное отклонение} = \Delta r\sigma / R = \lambda / (2n\text{SNR})$$

где  $\sigma$  - стандартное отклонение шума в системе, а SNR - отношение сигнал/шум.

При S/N = 18 дБ мы получаем SNR = 63,096 (прибл.)

Следовательно, относительное стандартное отклонение =  $\lambda / (2n\text{SNR}) = 4,59\text{e-}4$   
или 0,046%

$$\text{Абсолютное стандартное отклонение} = \sqrt{(\sigma^2 + \delta^2)}$$

где  $\delta$  - фиксированная ошибка случайного диапазона.

Исходя из S/N = 18 дБ, мы имеем  $\sigma / \delta = 4,14$  (прибл.)

Следовательно,  $\sigma = 4,14 * \delta = 4,14 \text{ м}$

$$\text{Абсолютная погрешность диапазона} = \delta + |b|$$

, где b - погрешность смещения диапазона.

Исходя из приведенных значений,  $\delta = 1 \text{ м}$  и  $|b| = 5 \text{ м}$ .

Следовательно, абсолютная погрешность дальности = 6 м

3- $\sigma$  значения относительной и абсолютной погрешностей диапазона:

Для нормального распределения интервал 3- $\sigma$  охватывает 99,73% данных. Следовательно, значение 3- $\sigma = 3 * \text{стандартное отклонение}$

Для относительной погрешности диапазона:

3-значение  $\sigma = 3 * \text{относительное стандартное отклонение} = 1,38\text{e-}3$  или 0,138%

Для абсолютной погрешности диапазона:

3-значение  $\sigma = 3 * \text{абсолютное стандартное отклонение} = 12,42\text{м}$

3- $\sigma$  абсолютный диапазон - погрешность измерения для 50 сглаженных импульсов:

Стандартное отклонение погрешности диапазона уменьшается в  $N^{0,5}$  раза при усреднении  $N$  импульсов.

Следовательно, стандартное отклонение абсолютной погрешности диапазона для 50 сглаженных импульсов равно:

$$\sigma' = \sigma / (N^{0,5}) = 0,585 \text{ м}$$

3- $\sigma$  значение абсолютной погрешности диапазона для 50 сглаженных импульсов:

$$3\text{-значение } \sigma = 3 * \sigma' = 1,76 \text{ м}$$

Таким образом, абсолютная погрешность измерения диапазона в  $3 \sigma$  для 50 сглаженных импульсов составляет 1,76 м.

#### 4.2. Задача 2

Антенный радар наблюдает цель с  $S/N = 12$  дБ. Полоса пропускания сигнала составляет 10 МГц, ошибка фиксированного диапазона составляет 2 м, а ошибка смещения диапазона составляет 10 м. Ширина луча составляет 2 градуса, погрешность фиксированного угла составляет 1 мрад, а погрешность смещения угла составляет 1,5 мрад. Длительность сигнала составляет 10 мс, частота - 9,5 ГГц (X-диапазон), фиксированная погрешность измерения радиальной скорости составляет 0,2 м/с, а погрешность смещения радиальной скорости составляет 0,1 м/с.

- а. Найдите погрешности 3- $\sigma$  в абсолютном и относительном диапазоне, угле и лучевой скорости (по результатам измерения доплеровской частоты).
- б. Найдите абсолютную и относительную погрешности измерения поперечного сечения в  $3 \sigma$  на расстоянии 500 км.
- с. Найдите абсолютную и относительную погрешности измерения диапазона и угла в 3- $\sigma$  при усреднении 10 измерений.

d. Найдите погрешности в  $3\text{-}\sigma$  радиальной и поперечной скоростях при использовании 10 импульсов с частотой PRF 5 Гц на целевой дальности 500 км. Предположим, что радиальная скорость получена из измерений дальности.

**Дано:**

- Отношение сигнал/шум (S/N) = 12 дБ
- Полоса пропускания сигнала = 10 МГц
- Исправлена ошибка дальности = 2 м
- Погрешность смещения по дальности = 10 м
- Ширина луча = 2 градуса
- Фиксированная угловая погрешность = 1 мрад
- Погрешность углового смещения = 1,5 мрад
- Длительность сигнала = 10 мс
- Частота = 9,5 ГГц (X диапазон)
- Исправлена ошибка радиальной скорости = 0,2 м/с
- Погрешность смещения радиальной скорости = 0,1 м/с
- Дальность до цели = 500 км
- Частота следования импульсов (PRF) = 5 Гц

**Для вычисления:**

- a.  $3\text{-}\sigma$  погрешности (абсолютные и относительные) в дальности, угле и лучевой скорости.
- b.  $3\text{-}\sigma$  погрешности  $\sigma$  (абсолютные и относительные) при измерении поперечной дальности на расстоянии 500 км.
- c.  $3\text{-}\sigma$  погрешности  $\sigma$  (абсолютные и относительные) в измерениях дальности и угла при усреднении 10 измерений.

d. 3-погрешности  $\sigma$  (радиальная скорость и скорость в поперечном направлении) при использовании 10 импульсов с частотой PRF 5 Гц на дальности 500 км.

**Решение:**

a. Ошибка в диапазоне 3- $\sigma$ ,  $\Delta r = \sigma r * 3$ , где  $\sigma r$  - стандартное отклонение ошибки диапазона.

$$\sigma r = \Delta r / (2 (S/N)^{0,5}) = 4,33 \text{ м}$$

$$\text{Следовательно, } \Delta r = \sigma r * 3 = 13,0 \text{ м}$$

Погрешность в 3  $\sigma$  в относительном диапазоне составляет  $\Delta r/R = 2,6e-5$ .

Погрешность в угле 3- $\sigma$ ,  $\delta\theta = \sigma\theta * 3$ , где  $\sigma\theta$  - стандартное отклонение угловой ошибки.

$$\Sigma\theta = \delta\theta / (2 (S/N)^{0,5}) = 0,87 \text{ мрад}$$

$$\text{Следовательно, } \delta\theta = \sigma\theta * 3 = 2,62 \text{ мрад}$$

Погрешность радиальной скорости в 3  $\sigma$ ,  $\Delta v = \sigma v * 3$ , где  $\sigma v$  - стандартное отклонение погрешности радиальной скорости.

$$\sigma v = \Delta v / (2 (S/N)^{0,5}) = 0,11 \text{ м/с}$$

$$\text{Следовательно, } \Delta v = \sigma v * 3 = 0,33 \text{ м/с}$$

b. Погрешность измерения поперечной дальности может быть рассчитана с использованием угловой погрешности и дальности до цели.

Абсолютная погрешность измерения поперечной дальности в 3  $\sigma$  составляет  $\Delta x = R * \Delta\theta = 1,31 \text{ км}$ .

Относительная погрешность измерения в поперечном диапазоне 3- $\sigma$  составляет  $\Delta x/R = 2,62e-3$ .

c. Усреднение уменьшает стандартное отклонение ошибок в  $1 / \sqrt{N}$  раз, где N - количество измерений.

Погрешность измерения абсолютного диапазона в  $3\sigma$  составляет  $\Delta r / \sqrt{N} = 4,12$  м при  $N = 10$ .

Погрешность измерения относительного диапазона в  $3\sigma$  составляет  $8,23e-6$  при  $N = 10$ .

Погрешность измерения абсолютного угла в  $3\sigma$  составляет  $\delta\theta / \sqrt{N} = 0,28$  мрад при  $N = 10$ .

Погрешность измерения относительного угла в  $3\sigma$  составляет  $5,56e-7$  при  $N = 10$ .

d. Разрешение по дальности,  $\Delta r = c / (2\Delta f) = 15$  м. Следовательно, доплеровское частотное разрешение  $\Delta fd = \Delta v / \lambda = 6250$  Гц.

Погрешность измерения радиальной скорости может быть вычислена с использованием  $\Delta r$  и  $\Delta fd$ .

Погрешность радиальной скорости в  $3\sigma$  составляет  $\Delta v = \Delta fd * \lambda / (4\tau) = 2,5$  м/с.

Погрешность скорости пересечения диапазона в  $3\sigma$  составляет  $\Delta v_x = \Delta v * (x / R) = 0,32$  м/с, где  $x$  - расстояние пересечения диапазона.



## ВЫВОД

Методы и системы радиолокационных измерений играют решающую роль в различных областях применения, включая авиацию, оборону, навигацию и метеорологию. Радар может обнаруживать и измерять положение, скорость и другие характеристики целей, предоставляя ценную информацию для различных применений.

Существуют различные типы радиолокационных систем, такие как импульсный радар, радар непрерывного действия и радар непрерывного действия с частотной модуляцией, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Выбор радиолокационной системы зависит от области применения и характеристик цели.

На радиолокационные измерения могут влиять различные погрешности, такие как погрешности дальности, угла и скорости, которые могут быть уменьшены с помощью соответствующих методов, таких как усреднение и калибровка. Отношение сигнал/шум (S/N) также имеет решающее значение для определения точности радиолокационных измерений.

В целом, методы и системы радиолокационных измерений играют решающую роль в различных областях применения, и достижения в области технологий продолжают повышать их точность, чувствительность и надежность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пеньковский, Л.А. Радиолокационные системы: учебник для вузов. — СПб.: Питер, 2017. — 480 с.
2. Биндер, А.Е. Радиолокационные системы и комплексы: учебник для вузов. — М.: Радиотехника, 2013. — 496 с.
3. Иванов, А.В. Измерения в радиотехнике: учебное пособие. — СПб.: Питер, 2010. — 384 с.
4. Кузнецов, А.В. Радиотехнические измерения: учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 2013. — 448 с.
5. Фурман, В.Я. Радиотехнические измерения: учебное пособие. — М.: Радиотехника, 2010. — 416 с.
6. Прохин, В.Г. Измерения параметров радиолокационных систем: учебное пособие. — М.: Радио и связь, 2014. — 160 с.
7. Гончаров, А.В. Измерения в радиолокации: учебно-методическое пособие. — М.: Московский энергетический институт, 2012. — 128 с.
8. Быков, И.В. Радиолокационные системы: измерение параметров и принципы построения: учебное пособие. — Н. Новгород: НГТУ, 2014. — 78 с.
9. Брумянов, А.А. Методы и средства измерения в радиотехнике: учебное пособие. — М.: ЗАО НПК «Софтлаб-НСК», 2016. — 352 с.
10. Шуришкин, Ю.А. Радиотехника: учебник для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. — 744 с.
11. Бартон Д. К. и Х. Р. Уорд, Справочник по радиолокационным измерениям, Дедхэм, Массачусетс: Artech Дом, 1984 год.
12. Брукнер Э., “Основы антенной решетки”, глава 2 “Практическая фазированная антенная решетка” Антенные системы, Норвуд, Массачусетс: Artech House, 1991.

13. Сверлинг П., “Точность радиолокационных измерений”, глава 4 в руководстве по радиолокации, М. И. Сколник, (ред.), Нью-Йорк: Макгроу-Хилл, 1970.
14. Рак Г. Т. и др., Справочник по поперечному сечению радара, том 1, Нью-Йорк: Plenum Press, 1970.
15. Бартон Д. К., Анализ современных радиолокационных систем, Норвуд, Массачусетс: Artech House, 1988.
16. Сколник М. И., Введение в радиолокационные системы, 2-е изд., Нью-Йорк: Макгроу-Хилл, 1980.
17. Блэкман, С. С., Отслеживание нескольких целей с помощью радаров, Дедхэм, Массачусетс: Artech Дом, 1986 год
18. Радиолокационный обзор в системах РЛС – Шафиев Э. Р.
19. Основные свойства радиоволн и методы радиолокации – Казымов М. Э.
20. Увеличение дальности действия радиолокационных систем – Гашимов Н. Я.

## СПИСОК АБРЕВИАТУРЫ

1. LOS: LOS означает "Прямая видимость". В радиолокационной системе LOS относится к прямой линии между радаром и целью. .
2. RCS: RCS означает поперечное сечение радара. Это показатель отражательной способности объекта для радиолокационных волн. .
3. RCC: RCC расшифровывается как взаимная корреляция радаров. Это показатель сходства между двумя радиолокационными сигналами.
4. GDOP: GDOP означает геометрическое снижение точности. Это показатель точности способности радиолокационной системы оценивать местоположение.
5. S/N: S/N означает отношение сигнал/шум. Это показатель силы сигнала, возвращаемого целью, по сравнению с шумом в системе.
6. CLUT - Clutter map
7. COTS - готовые коммерческие
8. DDC - цифровой понижающий преобразователь
9. DSP - цифровой сигнальный процессор
10. EMI - электромагнитные помехи
11. FFT - быстрое преобразование Фурье
12. FMCW - непрерывная волна с частотной модуляцией
13. GMTI - Индикатор наземной движущейся цели
14. IFF - Идентификация друга или врага
15. ILA - Синфазный и квадратурно-амплитудный
16. LPI - низкая вероятность перехвата
17. MTI - Индикатор движущейся цели
18. PPI - индикатор положения в плане
19. PRF - Частота следования импульсов
20. ZB - Нулевое смещение