

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ В РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ НА ФОНЕ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ

В.А. Таршин, В.А. Васильев  
(представил д.т.н., проф. А.В. Кобзев)

*Предлагается метод устранения систематической ошибки измерения угловой координаты цели в РЛС с антенной решеткой на фоне активной шумовой помехи, воздействующей по главному лепестку диаграммы направленности. Показано, что применение этого метода позволяет осуществлять измерение угловых координат с меньшими, по сравнению с использованием нормированной достаточной статистики, флюктуационными ошибками.*

В ряде работ, например [1-5], достаточно подробно изучены вопросы получения оценок максимального правдоподобия параметров полезного сигнала (координат источника его излучившего) при обработке на фоне внутренних флюктуационных шумов приемной аппаратуры радиолокационных станций (РЛС). Оценка направления приема  $\psi$  квазидетерминированного сигнала может находиться из условия максимума логарифма отношения правдоподобия  $\ln L(\psi)$ , полученного после усреднения по случайным амплитуде и начальной фазе сигнала [1, 3]:

$$\ln L(\psi) = \frac{q^2(\psi) |\dot{Z}_n(\psi)|^2}{4(1 + q^2(\psi)/2)} - \ln(1 + q^2(\psi)/2), \quad (1)$$

где

$$|\dot{Z}_n(\psi)|^2 = |\dot{Z}(\psi)|^2 / q^2(\psi) \quad (2)$$

- квадрат модуля нормированного весового интеграла;

$$|\dot{Z}(\psi)| = \left| \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{Y}^T(t) \dot{R}^*(t, \psi) dt \right| \quad (3)$$

- модуль комплексного весового интеграла;

-  $q^2(\psi) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}^T(t, \psi) \dot{R}^*(t, \psi) dt$  - параметр обнаружения;  $\dot{Y}(t)$ ,  $\dot{X}(t, \psi)$ ,

$\dot{R}(t, \psi)$  - вектор-столбцы комплексных амплитуд принимаемого колебания, ожидаемого сигнала и весовой функции соответственно, причем,

$\dot{\mathbf{X}}(\mathbf{t}, \boldsymbol{\psi})$ ,  $\dot{\mathbf{R}}(\mathbf{t}, \boldsymbol{\psi})$  разделяются на пространственные  $\dot{\mathbf{X}}(\boldsymbol{\psi})$ ,  $\dot{\mathbf{R}}(\boldsymbol{\psi})$  и временные  $\dot{\mathbf{X}}(\mathbf{t})$ ,  $\dot{\mathbf{R}}(\mathbf{t})$  сомножители;  $\mathbf{t}$ ,  $*$  – знаки транспонирования и комплексного сопряжения;  $\boldsymbol{\psi}$  – обобщенный параметр, выраженный в долях полуширины диаграммы направленности.

При обработке квазидетерминированного сигнала на фоне флюктуационных шумов оценка направления приема  $\hat{\boldsymbol{\psi}}$  по максимуму (1) является несмещенной. В этом случае направление максимума результирующей диаграммы направленности (ДН) приемной антенной решеткой (АР) совпадает с направлением приема полезного сигнала.

Часто наряду с полезным сигналом на вход приемной системы РЛС воздействуют мешающие сигналы, отраженные от близко расположенных относительно цели источников, либо излученные ими (например, активные шумовые помехи). Для этой практически важной ситуации недостаточно исследованы вопросы построения измерителей и определения их статистических характеристик. Известно [1, 2], что в процессе измерения направления приема сигнала, отраженного от цели, согласно (1), в результирующей ДН решетки формируются провалы, ориентированные на источники активных шумовых помех (АШП). Формирование провалов, в свою очередь, приводит к искажению ДН приемной решетки. Вследствие этого, при малых различиях между направлениями приема сигнала и АШП адаптивное формирование провалов приводит к смещению максимума (1) и оценка направления приема полезного сигнала осуществляется с систематической ошибкой.

Величина смещения максимума (1) зависит от количества постановщиков активных шумовых помех, их углового положения относительно направления на цель. Смещенным оказывается также максимум модуля комплексного весового интеграла  $|\dot{\mathbf{Z}}(\boldsymbol{\psi})|$  [1, 2].

Для получения несмещенной оценки угловой координаты цели при многоканальном приеме сигналов в качестве достаточной статистики для измерения выбирают квадрат модуля нормированного весового интеграла [1, 2, 3, 5]. Нормировка устраняет систематическую ошибку, однако дисперсия флюктуационной ошибки измерения оказывается больше, чем при наличии систематической ошибки [4].

**Цель данной статьи** – рассмотреть возможности повышения точности измерения угловой координаты цели, прикрываемой внешними коррелированными по пространству АШП, методом компенсации систематической ошибки и обеспечения меньших, по сравнению с использованием нормированной достаточной статистики, флюктуационных ошибок измерения.

Пусть, как и в [3], активная РЛС с эквидистантной линейной антенной решеткой принимает квазидетерминированный сигнал на фоне

внутренних шумов и активных шумовых помех.

Для случая воздействия АШП от одного источника на рис. 1 приведены нормированные по максимальному значению статистики (1), (2) и (3) в зависимости от ожидаемого направления приема  $\psi$ .

Здесь же стрелками обозначены направления прихода сигнала и помехи. По результатам математического моделирования на рис. 2 приведены систематические ошибки измерения направления прихода полезного сигнала  $M_{\psi \ln L(\Delta\psi)}$  и  $M_{\psi Z(\Delta\psi)}$  для статистик

(1) и (3) в зависимости от разности угловых положений цели и одного постановщика АШП  $\Delta\psi$ . При этом полагалось, что превышение сигнала и АШП над шумами составляет  $h_c = 20$  дБ и  $h_n = 40$  дБ, а число элементов АР  $m = 10$ .

На рис. 3 для указанной выше моделируемой обстановки построены (по отношению к дисперсии ошибок измерения на фоне внутренних шумов) флуктуационных ошибок измерения углового положения цели для трех указанных на рис. 1 достаточных статистик (1), (2), и (3):

$$\sigma_1^2(\Delta\psi)/\sigma_0^2 \text{ - для } \ln L(\Delta\psi), \sigma_n^2(\Delta\psi)/\sigma_0^2 \text{ - для } |\dot{Z}_n(\Delta\psi)|^2$$

и  $\sigma_z^2(\Delta\psi)/\sigma_0^2 \text{ - для } |\dot{Z}(\Delta\psi)|^2$ . Из анализа этих рисунков следует, что для наиболее просто реализуемого алгоритма с использовани-

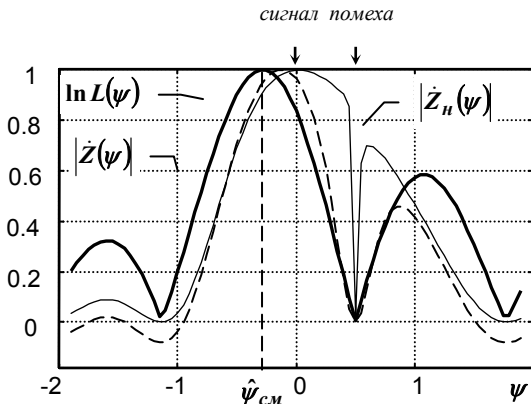


Рис. 1. Зависимость нормированных по максимальным значениям достаточных статистик от ожидаемого направления приема

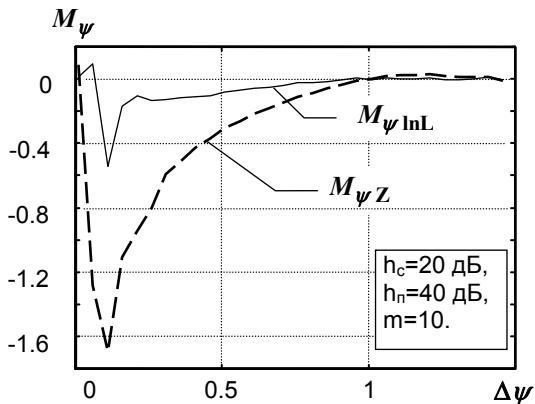


Рис. 2. Зависимость систематических ошибок измерения от разности угловых положений цели и постановщика АШП для  $\ln L(\Delta\psi)$  и  $|\dot{Z}(\Delta\psi)|^2$

ем  $|\dot{Z}(\psi)|$  имеем наибольшее смещение оценки направления на цель относительно истинного, но этому алгоритму измерения соответствует значительно меньшее (по сравнению с  $|\dot{Z}_n(\psi)|$ ) значение дисперсии флюктуационных ошибок. Следовательно, точность измерения направления прихода сигнала, отраженного от цели на фоне АПП можно повысить, если использовать в качестве достаточной статистики  $|\dot{Z}(\psi)|$  или  $\ln L(\psi)$  и при этом скомпенсировать систематическую ошибку.

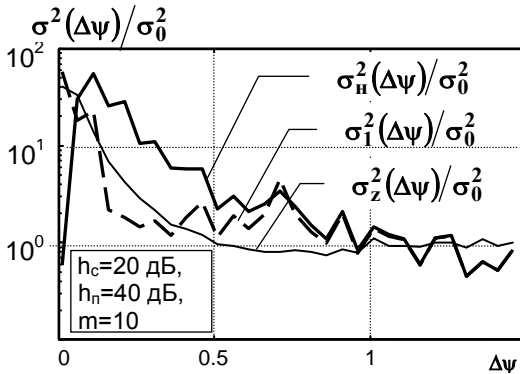


Рис. 3. Относительные дисперсии флюктуационных ошибок измерения углового положения цели на фоне АПП

Возможный вариант структурной схемы измерителя направления прихода сигнала с компенсацией систематической ошибки приведен на рис. 4. В состав этого измерителя входят основной и вспомогательный каналы. Основной канал предназначен для получения оценки направления приема  $\hat{\psi}_{cm}$  по статистике (3) и включает антенную решетку, блок формирования обратной корреляционной

матрицы помех (КМП)  $\Phi^{-1}$ , матричный множитель для формирования  $\dot{R}(\psi) = \Phi^{-1} \dot{X}(\psi)$  и измеритель 1 для непосредственного формирования оценки  $\hat{\psi}_{cm}$ . Вспомогательный канал предназначен для вычисления величины смещения  $M_{\psi Z}$  с использованием контрольного сигнала. Он включает измеритель 2, аналогичный измерителю 1, сумматор  $\Sigma_1$ , устройство сравнения, элемент «и». Кроме того, в состав измерителя входят блок формирования ожидаемого (ОС) и контрольного (КС) сигналов, датчики направлений ОС и КС и сумматор  $\Sigma$ . В измерителе 2 вспомогательного канала формируется набор контрольных статистик  $|\dot{Z}(\psi, \psi_{kci})|$  (рис. 5) в соответствии с выражением

$$|\dot{Z}(\psi, \psi_{kci})| = \left| \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{X}^T(t, \psi_{kci}) \dot{R}^*(t, \psi) dt \right|,$$

где  $\dot{X}(t, \psi_{kci})$  - вектор-столбец комплексных амплитуд КС для фиксиро-

ванного известного направления  $\psi_{kci}$ ,  $i = 1..n$ , а  $\dot{R}(t, \psi)$  - весовой вектор, который получен в основном канале для оценивания  $\hat{\psi}_{cm}$  (рис. 4).

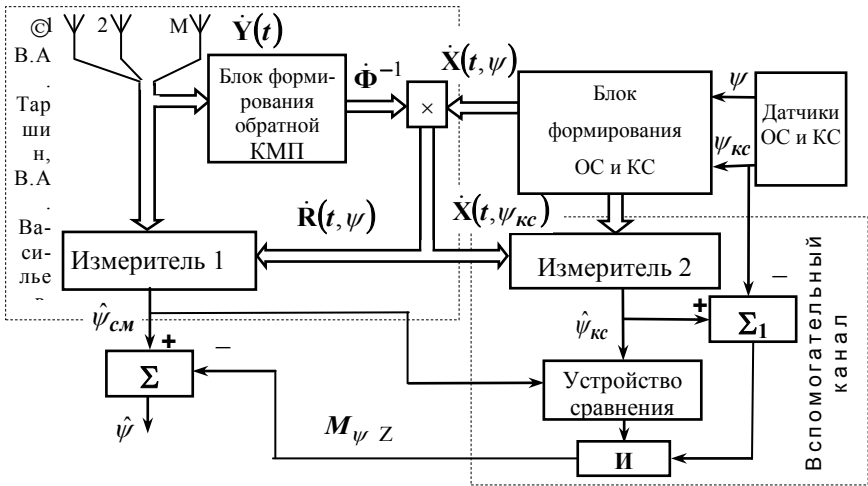


Рис. 4. Структурная схема измерителя направления прихода сигнала с компенсацией систематической ошибки

Максимумы контрольных статистик  $|\dot{Z}(\psi, \psi_{kci})|$  (рис. 5) также смещены, причем смещение максимума одной из  $n$  статистик  $|\dot{Z}(\psi, \psi_{kci})|$  аналогично смещению статистики (3) для данной входной реализации  $\dot{Y}(t)$ . На рис. 5 этому случаю соответствует статистика  $|\dot{Z}(\psi, \psi_{kc2})|$ , обозначенная сплошной линией. В то же время положению максимума  $\hat{\psi}_{kc2}$  контрольной статистики соответствует известное направление приема контрольного сигнала  $\psi_{kc2}$ , что позволяет оценить величину смещения (систематическую ошибку)  $M_{\psi Z} = \hat{\psi}_{kc2} - \psi_{kc2}$ .

Несмещенную оценку углового направления  $\hat{\psi}$  можно получить в виде

$$\hat{\psi} = \hat{\psi}_{cm} - M_{\psi Z}.$$

Величина смещения формируется на выходе сумматора  $\Sigma_1$  (рис. 4) и при выполнении условия  $(\hat{\psi}_{cm} - \hat{\psi}_{kci}) \Rightarrow \min$  через элемент «и» выдается на сумматор  $\Sigma$  для получения несмещенной оценки  $\hat{\psi}$ .

Заметим, что последовательное сравнение может быть заменено

параллельным с использованием параллельных измерителей 2, блоков сравнения и элементов «И».

Таким образом, применение предлагаемого метода позволяет компенсировать систематическую ошибку измерения

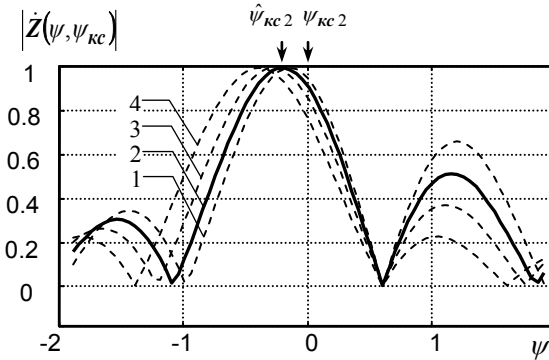


Рис. 5. Контрольные статистики  $\left| \dot{Z}(\psi, \psi_{кci}) \right|$ , формируемые во вспомогательном канале

главному лепестку диаграммы направленности, как показано выше, малы по сравнению с использованием в качестве достаточной статистики модуля нормированного весового интеграла.

Авторы выражают благодарность С.Т. Багдасаряну и В.П. Рябухе за внимание к работе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
2. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана.: – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998.
3. Рябуха В. П., Таршин В. А. Текущее измерение информативных параметров сигнала со случайными начальной фазой и амплитудой на фоне помех // Радиофизика и радиоастрономия. – 2000. – Т. 5. – № 2. – С. 206 - 210.
4. Багдасарян С.Т., Белов А.А., Рябуха В.П., Таршин В.А. Неследящее измерение в РЛС с адаптивной антенной решеткой информативных параметров сигнала со случайными амплитудой и начальной фазой на фоне помех // ИПРЖ «Антенны». – 2000. – Вып. № 2 (45). – С. 78 - 83.
5. Далматов А.Д., Лукошкин А.П. Измерение угловых координат многоканальными радиолокационными системами. – Аналоговые и цифровые методы обработки радиосигналов в современных радиосистемах / ЛЭТИ – Л., 1977. – Вып. 110. – С. 64 - 69.

Поступила 18.04.2002

**ТАРШИН Владимир Анатольевич** – ассистент кафедры ХВУ. В 1996 году окончил ХВУ. Область научных интересов - измерение параметров радиолокационных сигналов.

**ВАСИЛЬЕВ Вадим Анатольевич** - адъюнкт кафедры ХВУ. В 1997 году окончил ХВУ. Область научных интересов - измерение параметров радиолокационных сигналов.

---