

## **Повышение дальности действия пассивных радиолокационных систем, использующих сигналы телекоммуникационных источников**

Рогожников Е.В., к.т.н. Великанова Е.П., Шибельгут А.А.  
Томский государственный университет управления и радиоэлектроники  
8 (382) 241-34-78, [raliens@mail.ru](mailto:raliens@mail.ru), [udzhon@mail.ru](mailto:udzhon@mail.ru), [shibelgut@gmail.com](mailto:shibelgut@gmail.com)

к.т.н. Ворошилин Е.П.  
Университет машиностроения  
8 (495) 223-05-23, [voroshilin@mami.ru](mailto:voroshilin@mami.ru)

*Аннотация.* В статье рассматриваются особенности применения когерентного накопления в пассивных радиолокационных системах, работающих по сигналам телекоммуникационных источников. Описана методика когерентного накопления. Рассмотрены факторы, ограничивающие время накопления сигналов. Приведены зависимости дальности действия системы и отношения сигнал/шум принимаемого сигнала от времени накопления. Сделаны выводы о эффективности применения когерентного накопления в пассивных радиолокационных системах.

*Ключевые слова:* пассивная радиолокационная система, накопление сигналов, дальность действия, банк фильтров, импульсная характеристика, корреляционная функция.

### **Введение**

Пассивные радиолокационные системы (РЛС) [1], работающие по сигналам известных телекоммуникационных источников, обеспечивают максимальную скрытность радиолокационной станции, при этом не требуется излучение от радиолокационной цели (РЛЦ). Дальность действия подобных систем напрямую зависит от мощности источника сигнала и составляет от 2500 до 5000 м при эффективной поверхности рассеяния цели равной  $10 \text{ м}^2$  [1], что ограничивает их применение. Одним из способов, позволяющих повысить дальность действия радиолокационной системы, является накопление сигналов [2], отразившихся от радиолокационной цели. Применение накопления сигналов напрямую в подобных системах невозможно, поскольку сигналы, передаваемые телекоммуникационным источником содержат случайные данные, отличающиеся в каждом символе. В данной статье рассматривается способ, позволяющий использовать когерентное накопление в пассивных РЛС.

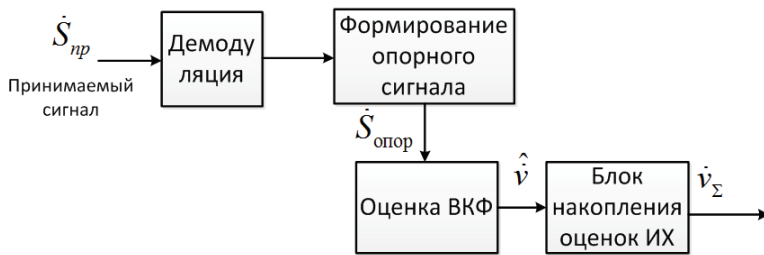
### **Методика увеличения дальности действия пассивных РЛС**

Суть когерентного накопления сигналов заключается в синфазном суммировании сигналов, отраженных от радиолокационной цели, для увеличения отношения сигнал/шум [2]. Структура кадра современных систем связи такова, что в нисходящем кадре передается известный сигнал синхронизации, а также информационные символы, содержащие случайные данные пользователей или данные эфирного вещания [1]. Такая структура кадра делает невозможным применение алгоритмов когерентного накопления напрямую. Одним из способов исключения случайной составляющей телекоммуникационных сигналов является накопление оценок взаимокорреляционной функции (ВКФ) между опорным и принятым сигналами, полученными по каждому принимаемому символу. Полученные таким образом результирующие оценки ВКФ позволяют оценить задержку сигнала, отраженного от радиолокационной цели, относительно прямого сигнала, поступившего от передатчика. Нахождение координат цели в таком случае решается известными методами [3].

Рассмотрим методику когерентного накопления радиосигналов в пассивных радиолокационных системах. Если предположить, что цель неподвижна, накопление может быть реализовано следующим образом:

- 1) принимается известный сигнал синхронизации от телекоммуникационного передатчика с известными координатами;
- 2) производится оценка импульсной характеристики канала РРВ между передатчиком и пассивным локатором;
- 3) используя оценку импульсной характеристики, полученную по сигналам синхронизации, производится демодуляция каждого информационного символа и формирование опорных сигналов для оценки ВКФ по каждому принимаемому информационному символу;
- 4) при использовании полученных опорных сигналов производится оценка и накопление ВКФ по каждому принятому символу.

Блок схема алгоритма приведена на рисунке 1.



**Рисунок 1. Блок схема алгоритма когерентного накопления**



**Рисунок 2. Схема расположения передатчика, пассивной РЛС и радиолокационной цели**

Вся обработка и накопление оценок ВКФ производится после аналого-цифрового преобразования в приемнике. Демодуляция сигнала производится по прямому сигналу, принимаемому от источника.

Оценка ВКФ может быть произведена различными методами [4], например:

$$\hat{v}(n) = \text{ifft}(\text{fft}(\dot{S}_{np} * (n)) \times \text{fft}(\dot{S}_{опор}(n))),$$

где:  $\dot{S}_{np}$  – принятый сигнал, отраженного от радиолокационной цели,  $\dot{S}_{опор}$  – опорный сигнал,  $\text{fft}$  – прямое преобразование Фурье,  $\text{ifft}$  – обратное преобразование Фурье,  $*$  – комплексное сопряжение,  $n$  – номер дискретного отсчета сигнала.

Результирующая оценка ВКФ формируется путем когерентного суммирования полученных частных оценок:

$$\dot{v}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \hat{v}_i,$$

где:  $N$  – количество оценок ВКФ,  $\hat{v}_i$  – оценка ВКФ по  $i$ -му символу.

Реальные радиолокационные цели движутся, это приводит к сдвигу частоты отраженного от радиолокационной цели сигнала, обусловленному эффектом Доплера [5]. Сдвиг частоты  $f_d$  для бистатической системы определяется выражением [5]:

$$f_d = \frac{2f}{c} \cdot |V| \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \cos \delta,$$

где:  $f$  – частота сигнала,  $V$  – вектор скорости радиолокационной цели, углы  $\varphi$  и  $\delta$  поясняются на рисунке 2.

На рисунке 2 обозначено:  $R$  – расстояние между передатчиком и пассивной РЛС,  $r_1$  – расстояние между передатчиком и радиолокационной целью,  $r_2$  – расстояние между пассивной РЛС и радиолокационной целью.

Запишем уравнение сигнала, отраженного от радиолокационной цели и принятого пассивной РЛС,  $s_{np}(t) = s(t) \cdot \exp(j2\pi(f_0 + f_d)t) = s(t) \cdot \exp(j2\pi f_0 t + \varphi(t))$ , где:  $s(t)$  – излученный

сигнал,  $\varphi(t) = 2\pi f_d t$  – фазовый набег принимаемого сигнала, вызванный движением цели [5]. Доплеровский сдвиг частоты  $f_d$  приводит к фазовому набегу, из-за которого сигналы при накоплении будут иметь рассогласование по фазе, вследствие чего накопление будет неэффективным. Для устранения рассогласования фаз, вызванного эффектом Доплера, необходимо применение фильтрации полученных оценок. Ее суть заключается в разделении сигнала на  $M$  параллельных каналов, в каждом из которых производится фазовый сдвиг каждого отсчета принятого и проходящего через него сигнала на угол  $d\varphi_1 \dots d\varphi_M$ , где  $M$  – количество каналов в банке фильтров (рисунок 3). Сигнал на каждом из выходов фильтра определяется выражением:  $Y_{\text{пр}1}(n) = S_{\text{пр}1}(n) \cdot e^{(j \cdot n \cdot d\varphi_1)}$ , ...,  $Y_{\text{пр}M}(n) = S_{\text{пр}M}(n) \cdot e^{(j \cdot n \cdot d\varphi_M)}$ . Значение и количество коэффициентов  $d\varphi_1 \dots d\varphi_M$  рассчитывается, исходя из интересующего диапазона скоростей воздушной цели.

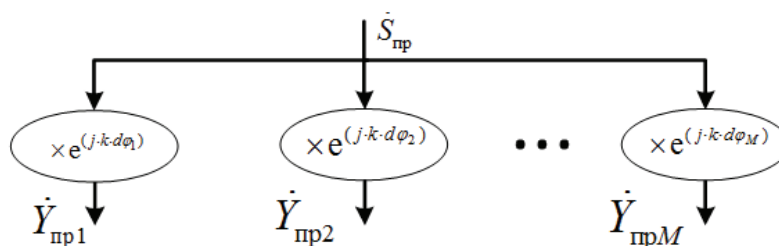


Рисунок 3. Структура доплеровского фильтра

С учетом доплеровской фильтрации принимаемых сигналов блок-схема исходного алгоритма примет вид, изображенный на рисунке 4.

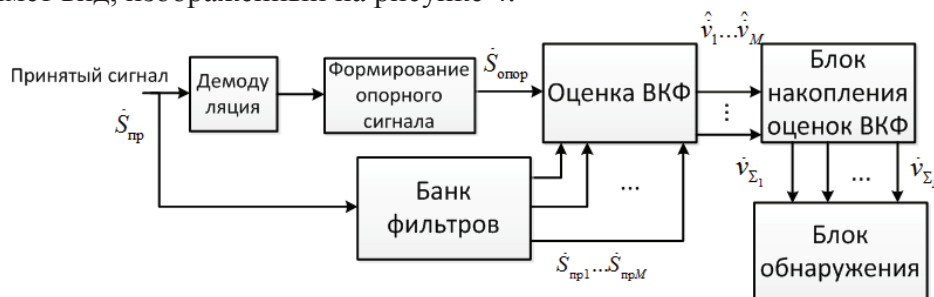


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма когерентного накопления с учетом доплеровской фильтрации

Блок обнаружения выполняет обнаружение сигнала, отраженного от радиолокационной цели, по максимальному уровню накапливаемого сигнала в каждом канале (1...M).

### Результаты моделирования

Рассчитаем отношение мощности отраженного сигнала к мощности шума в приемнике для пассивной радиолокационной системы, параметры которой приведены в таблице 1, при взаимном расположении передающего и приемного пунктов, изображенных на рисунке 2.

Мощность сигнала на выходе приемной антенны определяется выражением [6]:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r_1^2 r_2^2},$$

где:  $P_{\text{пер}}$  – мощность передающей антенны,

$G_{\text{пер}}$  – коэффициент усиления передающей антенны,

$G_{\text{пр}}$  – коэффициент усиления приемной антенны,

$\sigma$  – ЭПР радиолокационной цели,

$P_{\text{отр}}$  – мощность радиосигнала, отраженного от радиолокационной цели,

$\lambda$  – длина волны.

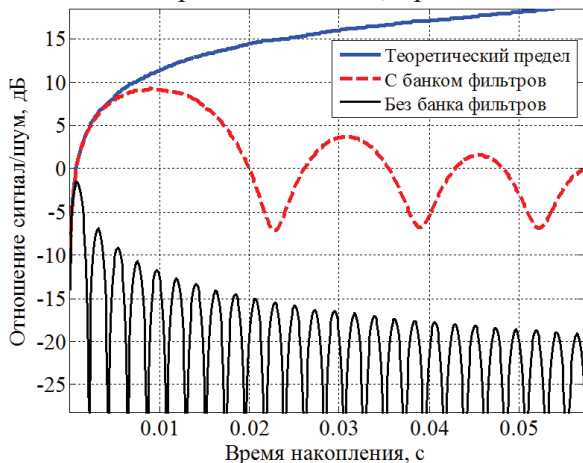
Отношение мощности отраженного от радиолокационной цели сигнала к мощности шума приемника для параметров, приведенных в таблице 1, составит – 10 дБ. Использование накопления оценок импульсной характеристики по описанному выше алгоритму, позволяет увеличить отношение сигнал/шум.

Таблица 1.

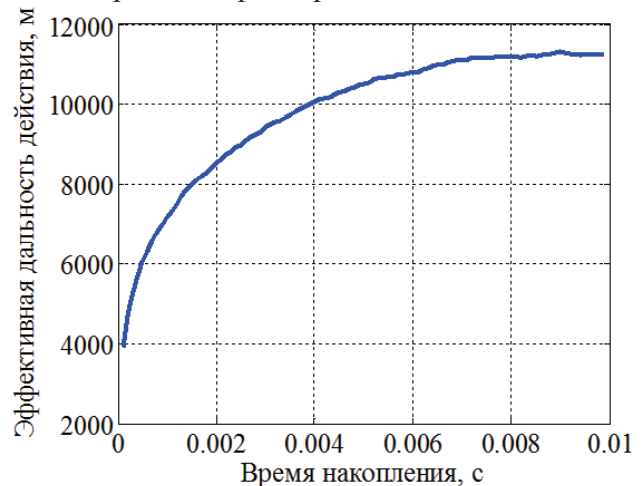
### Параметры исследуемой радиолокационной системы

Излучаемая мощность (Вт)	50
Коэффициент усиления передающей антенны (дБ)	13
ЭПР цели, м <sup>2</sup>	10
Длина волны, м	0.125
Коэффициент усиления приемной антенны (дБ)	13
Минимальное отношение сигнал/шум, необходимое для обнаружения сигнала	10
Длительность импульса (мкс)	100
Мощность шума приемного тракта (дБм)	- 80
Расстояние между передающим и приемным пунктом (м)	2000
Высота радиолокационной цели (м)	4000
Потери при передаче сигнала (дБ)	2
Потери при приеме сигнала (дБ)	3

На рисунке 5 показана зависимость отношения сигнал/шум для сигнала, отраженного от радиолокационной цели, в зависимости от времени накопления при скорости радиолокационной цели равной 250 м/с, при наличии банка доплеровских фильтров и без него.



**Рисунок 5. Зависимость отношения сигнал/шум отраженного от радиолокационной цели сигнала от времени накопления**



**Рисунок 6. Зависимость эффективной дальности действия пассивной РЛС (ρ) от времени накопления**

Также приведена зависимость эффективной дальности действия от времени накопления при точном устранении доплеровского сдвига частоты (рисунок 6).

Эффективная дальность действия (ρ) для бистатической системы определяется выражением [7]:

$$\rho = \sqrt{(R_T R_R)_{\max}} = 4 \sqrt{\frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \lambda^2 \sigma F_1^2 F_2^2}{(4\pi)^3 k T_s B_{\text{шум}} (S/N)_{\min} L_{\text{пер}} L_{\text{пр}}}},$$

где:  $k$  – постоянная Больцмана,  $F_1$  – потери энергии при распространении до РЛЦ,

$F_2$  – потери энергии при распространении после отражения от РЛЦ,

$B_{\text{шум}}$  – шумовая полоса приемника,

$(S/N)_{\min}$  – отношение сигнал/шум, необходимое для обнаружения сигнала,

$L_{\text{пер}}$  – потери при передаче сигнала,  $L_{\text{пр}}$  – потери при приеме сигнала,

$T_s$  – шумовая температура приемника.

Использование когерентного накопления на интервале времени, не превышающем 2 мс, позволяет повысить отношение сигнал/шум без использования банка фильтров до – 3 дБ. Применение банка доплеровских фильтров позволяет достигнуть величины отношения сигнал/шум в 10 дБ. В том случае, когда коррекция доплеровского набега фаз выполняется абсолютно точно (известно доплеровское смещение частоты в каждый момент времени), отношение сигнал/шум может быть увеличено до 20 дБ (теоретический предел). Изменение положения РЛЦ в пространстве приводит к изменению доплеровского сдвига частоты (из-за изменения углов  $\varphi$  и  $\delta$ , в связи с этим отношение сигнал/шум на выходе банка фильтров не достигает своего теоретического предела. Результирующее отношение сигнал/шум зависит от времени накопления, скорости и направления движения радиолокационной цели, а также от количества каналов доплеровского банка фильтров. На приведенных на рисунках 5 и 6 зависимостях ошибка оценки доплеровского сдвига частоты не превышает 30 Гц. Количество фильтров в банке определяется исходя из интересующего диапазона скоростей РЛЦ, а также сектора обзора РЛС.

### Выводы

В статье рассматриваются особенности применения когерентного накопления сигналов, отраженных от радиолокационной цели, в пассивных радиолокационных системах, работающих по сигналам известных телекоммуникационных источников. Использование когерентного накопления напрямую невозможно, поскольку излучаемые сигналы содержат случайные данные пользователей, в связи с этим предлагается производить накопление оценок импульсных характеристик канала РРВ. С увеличением радиальной скорости РЛЦ уменьшается время когерентного накопления и результирующее отношение сигнал/шум принимаемого сигнала. Применение когерентного накопления импульсных характеристик позволяет в несколько раз повысить дальность действия пассивных РЛС в зависимости от времени накопления, скорости РЛЦ и количества доплеровских фильтров. Результаты расчета показали, что эффективная дальность действия пассивной РЛС, работающей по сигналам телекоммуникационных источников может быть увеличена в несколько раз (с 4 км до 11 км для данных приведенных в таблице 1).

### Литература

1. Рогожников Е.В., Ушарова Д.Н., Убайчин А.В. Использование сигналов современных телекоммуникационных систем в пассивных радиолокационных системах // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – т. 323. – №. 5.
2. Бункин Б.В., Борзов А.Б., Сучков В.Б. и др. Вопросы перспективной радиолокации (Коллективная монография) / под ред. Соколова А.В. – М.: Радиотехника, 2003.- 512 с.: ил. ISBN 5-93108-025-2
3. Кондратьев В.С. Многопозиционные радиотехнические системы// М.: Радио и связь, 1986. – 264с..
4. Ворошилин Е. П., Рогожников Е. В., Вершинин А. С. Метод повышения точности оценки передаточной функции канала распространения радиоволн // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – №. 3. – С. 133-137.
5. Chen V. The micro-Doppler effect in radar. – Artech House, 2011.
6. Willis N. J. Bistatic radar. – SciTech Publishing, 2005.
7. Kostylev V.I., Stukalova I.V. Bistatic radar: maximum range and effective area // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2006. № 1. С. 46-50.