

УДК 621.396.96: 621.397

А.П. КОНДРАТЕНКО, В.В. МАНАКОВ, П.А. КОВАЛЕНКО, С.В. ШАПОВАЛОВ

Харьковский военный университет, Украина

СИНХРОНИЗАЦИЯ ПОЗИЦИЙ В РАЗНЕСЕННОЙ СИСТЕМЕ С ПЕРЕДАЮЩИМИ СТАНЦИЯМИ СОТОВОЙ СВЯЗИ

Анализируются пути обеспечения взаимной синхронизации в многопозиционной радиолокационной системе, состоящей из приемного пункта и нескольких передающих. В качестве передающих пунктов используются базовые станции системы сотовой связи стандарта GSM.

разнесенная радиолокационная система, передающие базовые станции сотовой связи, синхронизация позиций

Постановка проблемы

В последнее время многопозиционные радиолокационные станции и системы (МПРЛС) являются перспективным направлением радиолокации, которое позволяет повысить помехозащищенность, живучесть и информационные возможности радиолокационных средств [1].

В общем случае для нормального функционирования МПРЛС необходимо выполнить ряд требований, в частности взаимную синхронизацию позиций МПРЛС и формирование опорных сигналов (прообраза зондирующего сигнала) в каждой (от каждой) позиции.

Анализ литературы

В настоящее время особый интерес вызывают МПРЛС, которые могут использовать сигналы передатчиков, не входящих в состав системы, т.е. использовать стороннее, “чужое” излучение. В качестве передатчиков в таких системах наиболее часто используются передатчики телевизионных центров и радиовещательных станций [2, 3].

В последние годы в разных странах проводятся исследования о возможности использования в качестве подсвечивающего сигнала излучения базовых станций (БС) систем сотовой связи стандарта GSM. Так, британская фирма Roke Manor Research при

участии аэрокосмического гиганта British Aerospace разработала технологию CELLDAR (сокращение от cellular phone radar), позволяющую использовать сети сотовой связи для обнаружения и слежения за воздушными, наземными и надводными целями [4]. В докладе на международной научно-технической конференции по радиолокации “Radar – 2003” обсуждалась возможность применения сигналов БС в МПРЛС и их точностные характеристики [5]. При этом возникает проблема обеспечения в приемной позиции прообраза (копии) зондирующего сигнала, который необходим для формирования корреляционного интеграла. Таким образом, в МПРЛС, которая использует излучение БС, также необходимо обеспечить взаимную синхронизацию позиций и формирование прообраза зондирующего сигнала в приемной позиции.

Цель статьи

Анализ возможностей и методов решения задач синхронизации и формирования прообраза зондирующего сигнала в МПРЛС с передающими базовыми станциями систем сотовой связи.

Методика анализа

Будем считать, что МПРЛС состоит из одной приемной и нескольких передающих позиций, в ка-

честве которых выступают БС. Как показал анализ, некоторую приемную позицию окружают 7 – 10 БС, а размеры баз лежат в пределах 25 – 55 км. В зависимости от измеряемых первичных координат в таком случае можно использовать следующие методы определения координат:

- суммарно-дальномерный (трилатерационный);
- угломерно-суммарно-дальномерный.

При использовании обоих методов необходимо решить задачу об определении начала отсчета суммарного времени запаздывания или задачу взаимной синхронизации позиций. Для обеспечения синхронизации позиций обычно используют межпозиционные линии связи и специализированные навигационные системы (системы единого времени) [1, 6]. Вследствие отсутствия межпозиционных линий свя-

зи между БС и приемной позицией и невозможности включения БС в систему единого времени с целью работы по определенной программе, единственным способом обеспечения синхронизации является прием прямого сигнала передатчика БС. Для этого в состав приемной позиции вводится дополнительный канал (устройство), который в дальнейшем будем называть опорным. Следует отметить, что наличие опорного канала позволяет одновременно решить задачу синхронизации и проблему наличия прообраза полезного в приемной позиции.

Рассмотрим энергетические соотношения для опорного канала в системе, состоящей из одной приемной (Pr) и N_{cp} передающих позиций ($Пер$), в качестве которых выступают БС. Качественно ситуация изображена на рис. 1.

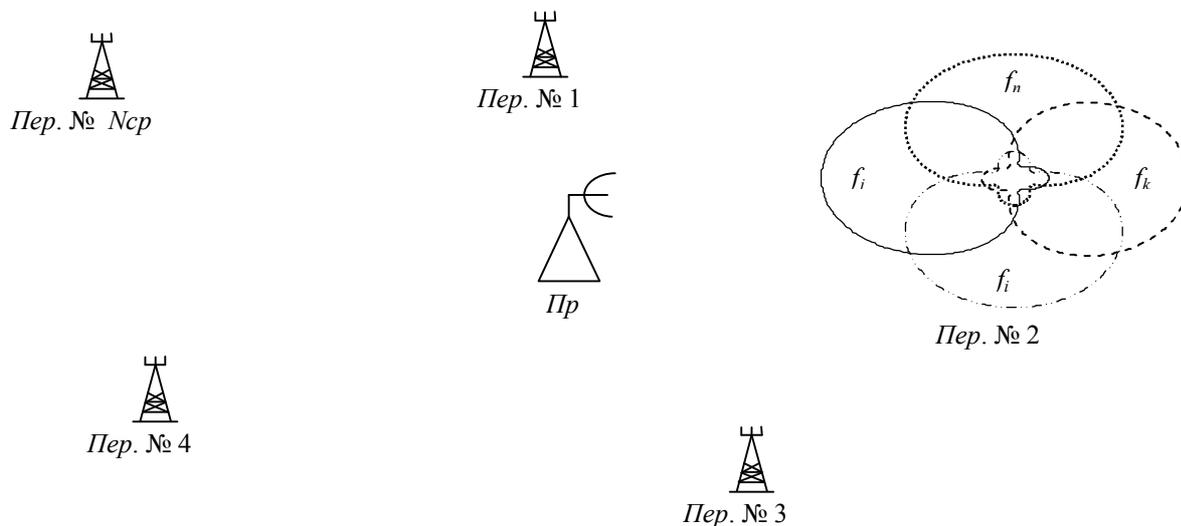


Рис. 1. Геометрия многопозиционной радиолокационной системы

За пределами города, как правило, диаграммы направленности (ДН) БС формируются при помощи четырех секторных ДН. Каждая секторная ДН характеризуется следующими параметрами:

- $G_{осгл} = 50$ – коэффициент усиления в главном луче;
- $G_{осбок} = 0,063$ – уровень первого бокового лепестка;
- $G_{осзад} = 3,16 \cdot 10^{-3}$ – отношение главного лепестка к заднему.

Следует отметить, что функционирование сотовой сети предусматривает излучение в секторах на своих частотах. Причем, повторное использование одних и тех же частот в соседних базовых станциях маловероятно. Таким образом, на вход приемной системы от каждой БС будет воздействовать 4 сигнала на разных частотах, т.е. необходимо решить задачу обнаружения каждого сигнала на фоне воздействия других. Из физических соображений понятно, что наиболее трудным будет обнаружение

сигнала, который излучается задним лепестком секторной ДН БС.

Как известно, процесс обнаружения характеризуется показателями качества обнаружения: условной вероятностью правильного обнаружения и условной вероятностью ложной тревоги. Показатели качества однозначно определяются параметром обнаружения или выходным отношением сигнал – помеха (ОСП) устройства оптимальной обработки, которое определяется [1]:

$$q = \sqrt{\frac{2 \cdot \mathcal{E}_{np}}{N_n}}, \quad (1)$$

где \mathcal{E}_{np} – энергия принимаемого сигнала;

N_n – спектральная плотность мощности помехи.

Следовательно, необходимо обеспечить такой уровень ОСП, который обеспечит обнаружение с заданными показателями качества. Поэтому определим отношение сигнал – помеха как целевую функцию. Практические возможности обеспечения ОСП определяются имеющимися различиями сигнала и помехи, т.е. возможностью селекции по тому или иному параметру. Из всех возможных видов селекции – пространственной, поляризационной, частотной, фазовой, временной, амплитудной, структурной [7] – в нашей сигнально-помеховой ситуации наиболее информативными оказываются пространственная и частотная. Это обусловило двухпараметрическую целевую функцию, рассматриваемую ниже.

В стандарте GSM – 900 (дециметровый диапазон длин волн) минимально возможный разнос несущих частот составляет 200 кГц [8]. В дальнейшем частотную селекцию будем учитывать при помощи коэффициента $K_{осл}$, который показывает, во сколько раз ослабляется соседний частотный канал, т.е. $K_{осл}$ характеризует степень избирательности по частоте по соседнему каналу.

Как видно из рис. 1, при обнаружении полезного сигнала одной из БС сигналы других БС будут выступать в качестве помех, но воздействовать они

будут с других пространственных направлений. Это позволяет использовать пространственную селекцию, которую будем учитывать двумя параметрами: $G_{гл}$ – коэффициент направленного действия антенны опорного канала; $G_{бок}$ – уровень бокового лепестка, по которому воздействует помеха (сигнал соседних БС). Будем считать, что $G_{бок}$ – это уровень первого бокового лепестка ДН опорного канала, это обеспечит некий запас в более легких случаях.

Найдем выражение для отношения сигнал – помеха как целевой функции, зависящей от указанных выше параметров частотной и пространственной селекции.

Выражение для \mathcal{E}_{np} получим из уравнения радиосвязи [9]:

$$\mathcal{E}_{np} = \frac{P \cdot t_u \cdot G_{nep} \cdot A_{эф np}}{4 \cdot \pi \cdot r^2}, \quad (2)$$

где P – мощность излучения БС;

t_u – длительность полезного сигнала;

G_{nep} – коэффициент усиления антенны БС (в рассматриваемом случае $G_{nep} = G_{осзад}$);

$A_{эф np}$ – эффективная площадь приемной антенны в направлении на полезный сигнал;

r – расстояние от источника излучения (БС) до приемной позиции (опорного канала).

В МПРЛС, в которой используется сигнал с неизвестным законом модуляции (случайный сигнал), используется корреляционная обработка. При корреляционной обработке отраженного от объекта сигнала шумовая полоса пропускания приемного устройства выбирается исходя из времени накопления. Расчеты показывают, что для типовых РЛС дециметрового диапазона оно составляет

$$t_n = (50 \dots 125) \text{ мс.}$$

Поэтому в качестве τ_u будем принимать t_n .

Спектральную плотность мощности помех N_n определим как

$$N_n = N_o + N_{БС} + N_{ср БС}, \quad (3)$$

где N_o – спектральная плотность мощности внутренних шумов опорного канала;

N_{BC} – спектральная плотность мощности помех, которые создаются этой же базовой станцией, т.е. воздействуют на опорный канал по главному лучу секторной ДН и по двум боковым лепесткам секторных ДН;

$N_{cp BC}$ – спектральная плотность мощности помех, которые создаются соседними БС.

Коэффициент шума приемных устройств дециметрового диапазона длин волн составляет $Kш = 3 \dots 10$, при этом $N_0 \ll N_{BC} + N_{cp BC}$, поэтому спектральной плотностью мощности внутренних шумов в выражении (3) можно пренебречь. Тогда выражение для N_{BC} примет вид

$$N_{BC} = \frac{P \cdot A_{эф пр} \cdot (G_{бс зл} + 2 \cdot G_{бс бок})}{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot K_{осл} \cdot \Delta f}, \quad (4)$$

где дополнительно к (2):

$G_{бс зл}$ – коэффициент усиления секторной ДН;

$G_{бс бок}$ – уровень бокового лепестка секторной диаграммы направленности, которым она воздействует на приемный канал;

$\Delta f = 200$ кГц – ширина спектра сигнала в стандарте GSM.

Аналогично получим выражение для $N_{cp BC}$:

$$N_{cp BC} = N_{cp} \cdot \frac{P \cdot A_{эф пр1} \cdot (G_{бс зл} + 2 \cdot G_{бс бок} + G_{бс зад})}{4 \cdot \pi \cdot r_{cp}^2 \cdot K_{осл} \cdot \Delta f}, \quad (5)$$

где N_{cp} – среднее число БС в районе приемной позиции;

$A_{эф пр1}$ – эффективная площадь приемной антенны в направлении на соседние (мешающие) БС;

$r_{cp} = 33$ км – среднее расстояние (база) от БС до приемной позиции.

Подставляя выражения (2 – 5) в (1) и считая, что

$$G_{зл} + 2 \cdot G_{бок} + G_{зад} \approx G_{зл} + 2 \cdot G_{бок},$$

после несложных преобразований получаем:

$$q(K_{осл}, a1) = \sqrt{K1 \cdot \frac{t_{нак} \cdot K_{осл}}{(N_{cp} \cdot a1 \cdot a2 + 1)}}, \quad (6)$$

где
$$K1 = \frac{2 \cdot G_{зад} \cdot \Delta f}{G_{общ}} = \frac{2 \cdot G_{зад} \cdot \Delta f}{G_{зл} + 2 \cdot G_{бок} + G_{зад}};$$

$$a1 = \frac{G_{бок}}{G_{зл}} - \text{обобщенный коэффициент, учиты-}$$

вающий пространственную селекцию;

$$G_{зл} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2} \cdot A_{эф пр} - \text{коэффициент усиления}$$

приемной антенны опорного канала в направлении на полезный сигнал;

$$G_{бок} = \frac{4 \cdot \pi}{\lambda^2} \cdot A_{эф пр1} - \text{коэффициент усиления}$$

приемной антенны опорного канала в направлении на соседние (мешающие) базовые станции систем сотовой связи;

λ – длина волны полезного сигнала;

$$a2 = \frac{r^2}{r_{cp}^2};$$

$t_{нак}$, N_{cp} , $K_{осл}$ – рассмотрены выше.

Анализ выражения (6) проведем при следующих данных:

$$N_{cp} = 10, r = 55 \text{ км и } t_{нак} = 50 \text{ мс,}$$

которые обеспечивают максимально возможное значение базы и минимально возможное время накопления.

Отметим, что задача обнаружения всегда будет решаться при меньших значениях q и больших $t_{нак}$. Численными методами с использованием математического пакета программ Mathcad была построена поверхность $q(K_{осл}, a1)$ и проведены сечения поверхности плоскостями постоянного уровня, т.е. плоскостями

$$q(K_{осл}, a1) = const.$$

Проекция полученных сечений на плоскости $(K_{осл}, a1)$ изображены на рис. 2.

Будем считать, что процесс обнаружения характеризуется значением условной вероятности правильного обнаружения $D = 0.9$ при условной вероятности ложной тревоги $F = 10^{-5}$, что охотно принимается многими авторами. При этом требуемое значение отношения сигнал – помеха равно [10]:

$$q = 14,8.$$

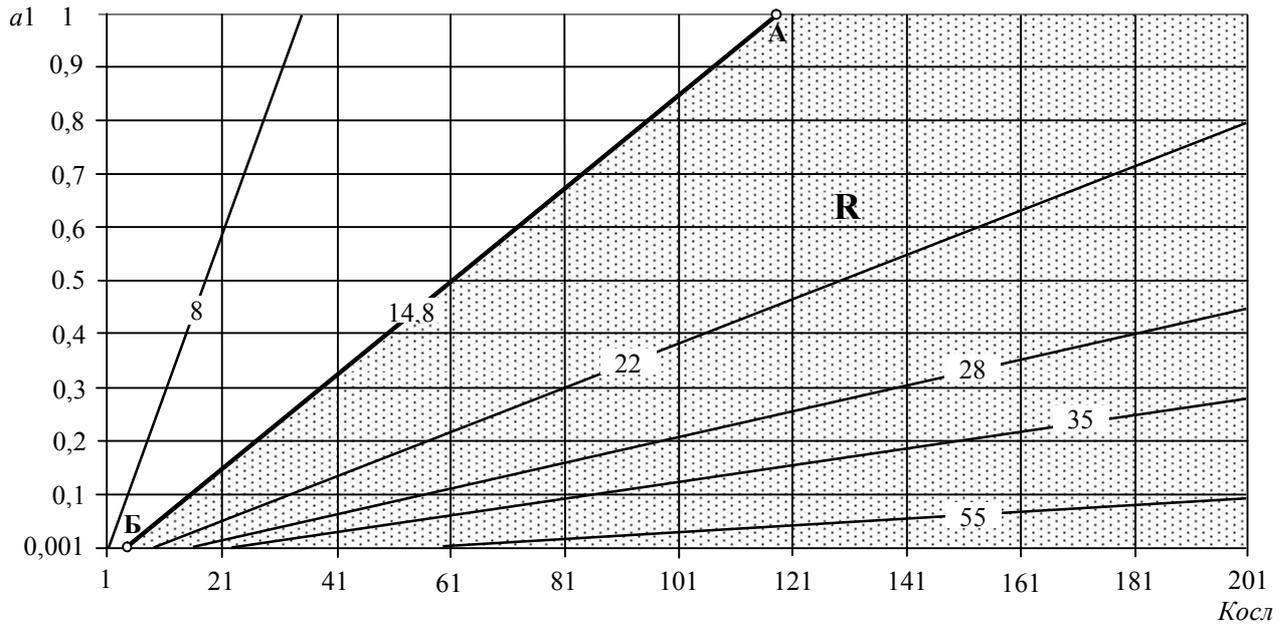


Рис. 2. Проекції сечень цільової функції

Для обнаружения сигнала с показателями качества, не хуже заданных, необходимо решить уравнение

$$q(K_{осл}, a1) \geq 14,8. \tag{7}$$

Геометрическим решением уравнения (7) является область R на рис. 2. Рассмотрим две крайние ситуации:

- 1) используется только частотная селекция, т.е. $a1 = 1$.
- 2) используется только пространственная селекция, т.е. $K_{осл} = 1$.

При отсутствии пространственной селекции ($a1 = 1$), что соответствует приему сигнала на ненаправленную антенну, неравенство (7) преобразуется к виду

$$K1 \cdot \frac{t_{нак} \cdot K_{осл}}{(N_{ср} \cdot a2 + 1)} \geq (14,8)^2. \tag{8}$$

Решение данного неравенства показывает, что обнаружение с показателями качества не хуже заданных обеспечивается при $K_{осл} \geq 116$.

Аналогичное решение получаем графически – точка A на рис. 2.

При отсутствии частотной селекции ($K_{осл} = 1$) из неравенства (7) получаем:

$$K1 \cdot \frac{t_{нак}}{(N_{ср} \cdot a1 \cdot a2 + 1)} \geq (14,8)^2. \tag{9}$$

Решая данное неравенство, получаем, что:

$$a1 = \frac{G1_{бок}}{G1_{эл}} \leq -0,027. \tag{10}$$

Последнее означает, что обнаружение с показателями качества, не хуже заданных, не обеспечивается – точка B на рис. 2. Объясняется это, с одной стороны, тем, что при отсутствии частотной селекции отсутствуют физические различия (кроме неизвестной структуры) в полезном сигнале и трех мешающих (помеховых) от одной и той же БС. Суммарная же мощность помех значительно больше мощности полезного сигнала. С другой стороны, наличие конечного уровня боковых лепестков ДН опорного канала не позволяет полностью избавиться от влияния многоточечных по пространству помех, в качестве которых выступают БС.

Следует отметить, что сигнал БС является случайным, с неизвестным законом модуляции, поэтому параметр обнаружения может быть найден из соотношения [10]:

$$q_{вых} = \frac{q1}{1 + q1} \cdot \frac{q2}{1 + q2} \cdot \Delta f \cdot T, \tag{11}$$

где q_1, q_2 – входные отношения сигнал – шум (по мощности) в каналах;

$\Delta f \cdot T$ – коэффициент накопления.

В качестве одного из входов коррелятора, например, q_1 , целесообразно использовать опорный канал, для которого $q_1 \gg 1$. На второй вход коррелятора подается отраженный от объекта сигнал, для которого в большинстве случаев $q_2 \ll 1$. Поэтому при совместном использовании пространственной и частотной селекции в опорном канале можно обеспечить необходимый уровень q_1 с целью обеспечения требуемого значения $q_{вых}$.

Выводы

1. В МПРЛС с передающими БС системы сотовой связи для обеспечения задач синхронизации и формирования опорных колебаний в приемной позиции необходимо организовывать прием прямого сигнала передатчика.

2. Для обеспечения необходимых энергетических соотношений в приемном канале целесообразно использовать частотную и пространственную селекцию. При использовании только пространственной селекции обеспечение заданных энергетических соотношений становится невозможным. Использование только частотной селекции позволяет обеспечить необходимое значение ОСП.

3. Совместное использование пространственной и частотной селекции в опорном канале позволяет повысить значение отношения сигнал – шум на выходе корреляционного обнаружителя, что особенно важно при обнаружении объектов на предельных значениях параметров.

Литература

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1992. – 416 с.
2. Кондратенко А.П. Роль и место нетрадиционной радиолокации в системе контроля воздушного пространства // Зб. наук. пр. ХВУ. – 2002. – Вип. 1 (39). – С. 87 – 90.
3. Рябов Б. Новый облик радиолокации ПВО // Воздушно-космическая оборона. – [Электр. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vko.Ru>.
4. Гвозденко А. Сотовая сеть в роли радара // Компьютерное обозрение. – 2003. – № 46. – С. 68.
5. Ширман Я.Д., Орленко В.М. Деякі тенденції розвитку радіолокації // III наукова конференція молодих вчених Харківського військового університету. Тези доповідей. – Х.: ХВУ. – 2003. – С. 3.
6. Аверьянов В.Я. Разнесенные РЛС и системы. – Минск.: Наука и техника, 1978. – 182 с.
7. Защита от радиопомех / Под ред. М.В. Максимова. – М.: Сов. радио, 1976. – 496 с.
8. Карташевский В.Г., Семенов С.Н., Фирстова Т.В. Сети подвижной связи. – М.: Эко – Трендз, 2001. – 299 с.
9. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Сов. радио, 1972. – 464 с.
10. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.

Поступила в редакцию 04.10.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Кобзев, Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков.