

УДК 621.396.96:621.391.8

И.Г. Леонов<sup>1</sup>, А.Н. Коржов<sup>1</sup>, Р.М. Животовський<sup>2</sup>, И.М. Пичугин<sup>1</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков<sup>2</sup>Центральный научно-исследовательский институт ВВТ ВС Украины, Киев

## О ВОЗМОЖНОСТИ СОГЛАСОВАНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЛОКАЦИОННОГО КАНАЛА И АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА МНОГОЧАСТОТНОГО ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА

*Предлагается метод борьбы с флуктуациями эхо-сигнала за счет их разделения на флуктуации вызванные движением цели и флуктуации вызванные средой распространения радиоволн и согласования в частотной области характеристик многочастотного зондирующего сигнала с характеристиками среды распространения радиоволн или с частотными характеристиками целей.*

**Ключевые слова:** многочастотный зондирующий сигнал, флуктуации эхо-сигнала, характеристики радиолокационного канала.

### Введение

**Постановка проблемы.** На современном этапе развития радиолокационной техники все более высокие требования предъявляются к ее информативности, помехозащищенности и точности измерений. Известно, что анализ зависимости от времени и направления на цель таких параметров отраженного сигнала, как амплитуда, частота, фаза и поляризация позволяет не только определить координаты и скорость движения, но и получить сведения о конфигурации отражающего объекта, характере поверхности и даже материале, из которого он изготовлен [1, 3]. В тоже время для РЛС узкого назначения избыточная информация может быть не только бесполезной, но и стать причиной снижения потенциальных возможностей РЛС.

Примером служат различного рода флуктуации отраженных сигналов, которые, являясь носителями информации, одновременно могут приводить к ухудшению характеристик обнаружения РЛС.

Основной причиной возникновения флуктуаций является многолучевое распространение радиоволн при когерентном их сложении в точке приема. При этом, основным источником многолучевости принято считать дискретный характер радиолокационного канала (характеристик целей и среды распространения) [1, 3, 4].

Отрицательное влияние флуктуаций отраженных сигналов на характеристики РЛС может быть устранено или, по крайней мере, уменьшено, если удастся каким-либо образом добиться их сглаживания. Одним из способов сглаживания флуктуаций является применение сложных зондирующих сигналов с большой базой. Этот подход позволяет разделить эхо-сигналы каждого луча для последующего некогерентного суммирования или выделения большего из них [4]. Другой подход строится на основе анализа априорной информации об импульсной или частотной характеристике радиолокацион-

ного канала и введения предсказаний в параметры зондирующего сигнала или в характеристики приемной системы [2, 6].

Наиболее просто [4, 6] реализуется второй подход к сглаживанию флуктуаций эхо-сигналов при многочастотном (МЧ) зондирующем сигнале. Это связано с возможностью согласования дискретного характера частотных характеристик радиолокационного канала и амплитудно-частотного спектра (АЧС) МЧ сигнала, а также с простотой управления параметрами МЧ сигнала и характеристиками системы его обработки. Реализация данного подхода позволяет приблизить ГТХ РЛС к потенциально достижимым.

**Цель статьи:** обоснование требований к параметрам многочастотных РЛС в условиях флуктуаций отраженного от цели сигнала.

### Изложение основного материала

На основе общепринятых сведений [2, 3] можно утверждать, что при использовании сложных зондирующих сигналов с большой базой радиолокационный канал (РК) нельзя считать гауссовым, а цель нельзя рассматривать как точечный объект. Это связано, в первую очередь, с многолучевостью распространения радиоволн, то есть с дискретностью временных и частотных характеристик РК. Последнее приводит к появлению флуктуаций эхо-сигнала. В этих условиях возможна реализация сглаживания в многочастотной РЛС, что в значительной степени определяется дискретным характером амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) многолучевого канала и амплитудно-частотного спектра МЧ сигналов. Причем надо понимать, что АЧХ РК можно разделить на частотные характеристики цели и частотные характеристики среды распространения.

Последнее позволяет за счет выбора параметров зондирующего сигнала согласовать АЧС МЧ зондирующего сигнала и АЧХ одной из этих двух составляющих РК. В результате этого реализуемые ГТХ

РЛС могут оказаться близки к потенциально возможным.

Как известно [1], оптимизация любой РЛС может проводиться тремя способами.

Если параметры зондирующего сигнала фиксированы, оптимизируется по выбранному критерию только приемный тракт, характеристики которого выбираются в соответствии с эхо-сигналами, последние в свою очередь, определяются характеристиками РК.

Второй способ оптимизации РЛС предполагает фиксацию способа обработки и оптимизацию по выбранному критерию параметров зондирующего сигнала в соответствии с характеристиками рассеяния радиолокационного канала.

Третий способ предполагает комплексирование первых двух способов оптимизации.

Каждому из указанных подходов свойственны и преимущества и недостатки. Первый и второй подход являются более предпочтительными, когда отсутствуют априорные сведения о целях. Их преимуществом является также простота формулировки задачи и оценки получающихся результатов. Недостатком такого подхода является трудность правильного выбора критерия оптимальности, имеющего смысл для широкого класса многоцелевых задач. Третий подход наиболее строг, однако его последовательное использование требует априорных сведений о радиолокационном канале и возможность совместной адаптации как приемных так и передающих устройств.

Используем третий подход для исследования вопросов выбора параметров МЧ сигнала, с учетом характеристик рассеяния РК. Для этого проанализируем характеристики канала, которые можно использовать в качестве априорной информации при выборе параметров МЧ зондирующего сигнала и устройств их обработки.

Как известно, при определенных допущениях процесс рассеивания электромагнитных волн в радиолокационном канале можно рассматривать как линейную параметрическую фильтрацию зондирующего сигнала [1, 3]. В большинстве практических случаев эхо-сигнал может рассматриваться как результат линейной фильтрации зондирующего сигнала линейной системой (фильтром) с заданной импульсной характеристикой РК  $h(t)$  или передаточной функцией рассеяния  $K(2\pi f)$ .

Тогда модель РК можно представить блок-схемой, приведенной на рис. 1.

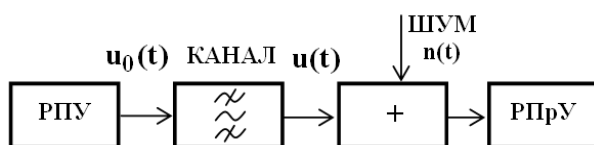


Рис. 1. Блок-схема радиолокационного канала:  
РПУ – радиопередающее устройство;  
РПРУ – радиоприемное устройство

Если  $u_0(t)$  и  $u(t)$  – зондирующий и отраженный сигналы соответственно, а  $G_0(2\pi f)$  и  $G(2\pi f)$  их спектры, то отклик фильтра, эквивалентного РК, на вход которого подается зондирующий сигнал  $u_0(t)$ , определяется, как известно, интегралом Дюамеля:

$$u(t) = \int_0^{\infty} h(t - \tau)u_0(\tau)d\tau = \int_0^{\infty} h(t)u_0(t - \tau)d\tau \quad (1)$$

или в частотном представлении записывается в виде

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G_0(2\pi f)K(2\pi f)e^{j2\pi ft} df, \quad (2)$$

где  $K(2\pi f)$  – передаточная функция линейного фильтра, эквивалентного каналу.

В соответствии с (1) и (2) при выбранном методе оптимизации многочастотной РЛС в начале проводится согласование зондирующего сигнала и устройств обработки с характеристиками цели или среды распространения. Это может осуществляться несколькими способами.

Первый из этих способов основан на получении импульсной характеристики  $h(t)$  РК и введении ее в качестве предискажения во временную структуру зондирующего сигнала.

Другой способ заключается в согласовании спектральной структуры зондирующего сигнала с передаточной функцией  $K(2\pi f)$  среды распространения радиоволн или цели. Третий способ является комбинацией первых двух.

Для многочастотной РЛС рассмотрим возможность согласования спектральной структуры МЧ зондирующего сигнала с АЧХ среды распространения радиоволн. Будем предполагать, что сглаживание флуктуаций, вызванных движением цели, осуществляется одним из рассмотренных выше способов, а также, что, как и в случае точечной цели, искажения структуры спектра эхо-сигнала по отношению к зондирующему были минимальны. Подсвет таким сигналом назовем согласованным в частотной области подсветом.

Таким образом, для предъявления требований к виду и параметрам МЧ зондирующего сигнала, обеспечивающего согласованный в частотной области подсвет необходимо проанализировать особенности частотных характеристик РК.

Экспериментальные исследования распространения радиоволн в слоистонеоднородной среде и отражения радиоволн сантиметрового и дециметрового диапазонов от объектов сложной формы показывают, что в эхо-сигналах преобладают отраженные сигналы от немногочисленных участков интенсивного отражения [3]. В рамках данного приближения принято считать, что полный отраженный сигнал складывается из эхо-сигналов отдельных локальных источников.

Как показано в [1 – 4], импульсная характеристика  $h(t)$  протяженной цели в простейшем случае может быть записана

$$h(t) = \frac{1}{A} \sum_{n=1}^N a_n \delta(t - t_{zn}), \quad (3)$$

где  $a_n$  – амплитуда сигнала  $n$ -го локального источника;  $A = \sqrt{\sum_{n=1}^N |a_n|^2}$  – нормирующий по мощности множитель;  $t_{zn}$  – время задержки сигнала  $n$ -го локального источника.

Передаточная функция РК-фильтра в соответствии с (3) имеет вид:

$$K(2\pi f) = \frac{1}{A} \sum_{n=1}^N a_n e^{-j2\pi f t_{zn}}. \quad (4)$$

Структурная схема фильтра, эквивалентного многолучевой среде распространения радиоволн с импульсной характеристикой (3) приведена на рис. 2.

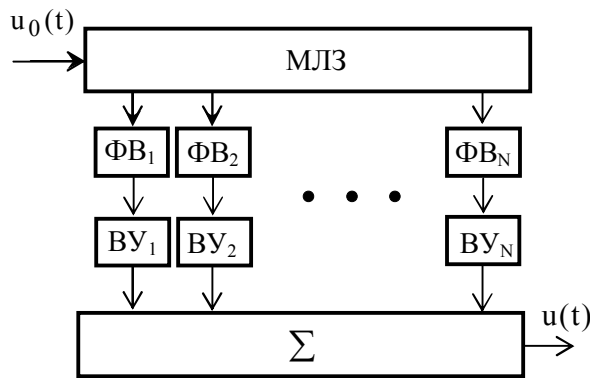


Рис. 2. Структурная схема фильтра, эквивалентного многолучевой среде распространения радиоволн

Схема включает в себя многоотводную линию задержки (МЛЗ), число отводов  $N$  которой равно числу локальных источников отражения на поверхности цели. Время задержки сигнала в каждом отводе, в общем случае, величина случайная и определяется временем  $t_{zn}$ . В каждом отводе имеется фазовращатель (ФВ) и весовой усилитель (ВУ), коэффициент усиления которого зависит от амплитуды  $a_n$  сигнала локального источника. Сигналы всех локальных источников суммируются в линейном сумматоре, который служит эквивалентом антенны РЛС.

Выходной сигнал сумматора  $u(t)$  представляет собой эхо-сигнал на входе радиоприемного устройства РЛС.

На основе сделанных допущений, импульсная характеристика в рамках рассматриваемой модели представляет собой последовательность  $\delta$ -импульсов со случайно меняющимися амплитудами  $a_n$  и временным положением  $t_{zn}$ .

Подобного рода импульсные случайные процессы подробно рассмотрены в [5].

Пусть импульсная характеристика (3) многолучевой среды распространения радиоволн рассматривается как реализация некоторого импульсного случайного процесса, для которого на временном интервале  $\left(-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right)$  появляется точно  $(2N+1)$  импульсов (число импульсов эквивалентно числу разрешаемых локальных центров). Пусть  $T$  – средний временной интервал между локальными центрами на поверхности цели, определяемый разрешающей способностью по дальности. Импульсы рассматриваемого случайного процесса расположены по обе стороны от нулевого, с которым связано начало отсчета времени, и нумеруются в порядке их следования на оси времени. Функция  $K_N^{(k)}(2\pi f)$  это спектральная плотность для функции  $h^{(k)}(t)$ , описывающей произвольную  $k$ -тую реализацию рассматриваемого случайного процесса. Энергетический спектр  $F_h(2\pi f)$ , которого находится из соотношения:

$$F_h(2\pi f) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{(2N+1)T} m_1 \left\{ \left| K_N^{(k)}(2\pi f) \right|^2 \right\}, \quad (5)$$

где  $m_1 \{ \dots \}$  – математическое ожидание.

Как показано в [5], с учетом (4), соотношение (5) можно записать в виде:

$$F_h(2\pi f) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{(2N+1)T} \left\{ \sum_{n=-N}^N m_1 \left\{ \left[ a_n^{(k)} \right]^2 \right\} + \sum_{n=-N}^N \sum_{\substack{i=-N \\ i \neq n}}^N m_1 \left\{ a_n^{(k)} a_i^{(k)} e^{-j2\pi f (t_{zn}^{(k)} - t_{zi}^{(k)})} \right\} \right\}. \quad (6)$$

Формула (6) дает общее представление об энергетическом спектре случайных последовательностей вида (3).

Частный вид выражения определяется следующими условиями: зависят ли вероятностные характеристики импульсов от их номера; можно ли считать, что вероятностные характеристики совокупности импульсов определяются только их взаимным расположением (то есть стационарен ли случайный процесс); существует ли корреляция между однородными параметрами различных импульсов и т.п. [5].

Для рассматриваемой модели многолучевого РК можно предположить, что амплитуды и моменты возникновения импульсов взаимно независимы и между однородными параметрами у различных импульсов корреляция отсутствует. Пусть  $\bar{a}_n$  и  $\sigma_n^2$  – медианное значение и дисперсия случайной амплитуды  $n$ -го импульса. Если обозначить:

$$m_1 \left\{ e^{-j2\pi f (t_{zn}^{(k)} - t_{zi}^{(k)})} \right\} = H_p(2\pi f),$$

то выражение (6) переписывается в виде:

$$F_h(2\pi f) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{(2N+1)T} \times \left\{ \sum_{n=-N}^N (\bar{a}_n^2 + \sigma_n^2) + 2 \sum_{p=1}^{2N} \sum_{\substack{n=-N \\ n+p \leq N}}^N \bar{a}_n \bar{a}_{n+p} \operatorname{Re}(H_p(2\pi f)) \right\}. \quad (7)$$

Для модели "локальних джерел" характерно, що кожен локальний участок отраження знаходиться в своєму інтервалі розрешення кінцевої довжинності. Це дозволяє розглядати змінюючуся в процесі локації імпульсну характеристику еквівалентного фільтра як імпульсний випадковий процес з детермінованим тактовим інтервалом [5, 6]. В якості прикладу на рис. 3 представлена довільна реалізація такого процесу.

В імпульсних випадкових процесах з детермінованим тактовим інтервалом момент появи  $t_{3n}^{(k)}$  будь-якого  $n$ -го імпульсу реалізації процесу може бути представлений в вигляді  $t_{3n}^{(k)} = nT + v_n^{(k)}$ , де  $T$  в даному випадку є довжиною тактового інтервалу;  $v_n$  – випадкова величина з нульовим середнім.

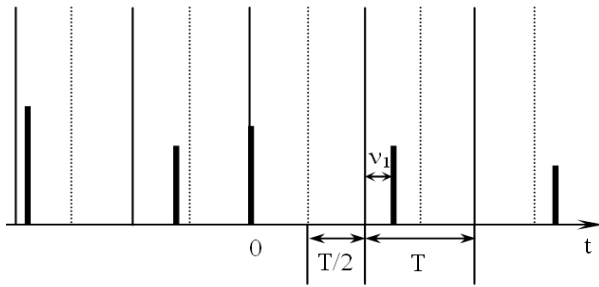


Рис. 3. Приклад реалізації імпульсного випадкового процесу з детермінованим тактовим інтервалом

Величина  $v_n$  по абсолютному значенню не перевищує значення  $\frac{T}{2}$ , так як за один такт виникає тільки один імпульс. Нехай  $\theta_{iv}(2\pi f)$  – одностороння характеристична функція випадкової величини  $v_n$ . Тоді, відповідно до допущення про незалежність одноіменних параметрів різних імпульсів, функція  $H_p(2\pi f)$  має вигляд:

$$H_p(2\pi f) = e^{-j2\pi f T} m_1 \left\{ e^{-j2\pi f [v_n^{(k)} - v_i^{(k)}]} \right\} = |\theta_{iv}(2\pi f)|^2 e^{-jp2\pi f T}.$$

Соотношение (7) переписується в вигляді:

$$F_h(2\pi f) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{(2N+1)T} \left\{ \sum_{n=-N}^N (\bar{a}_n^2 + \sigma_n^2) + 2 \sum_{p=1}^{2N} \sum_{\substack{n=-N \\ n+p \leq N}}^N \bar{a}_n \bar{a}_{n+p} |\theta_{iv}(2\pi f)|^2 \cos(p2\pi f T) \right\}. \quad (8)$$

Аналіз виразу (8) показує, що енергетичний спектр розглянутого імпульсного випадкового процесу залежить не від виду закону розподілу випадкових амплітуд  $a_n^{(k)}$  імпульсів, а тільки від їх медіанних значень  $\bar{a}_n$  і дисперсій  $\sigma_n^2$ . Крім цього в (8) тільки функції  $\theta_{iv}(2\pi f)$  і  $\cos(p2\pi f T)$  залежать від частоти і визначають нерівномірність амплітудної структури енергетичного спектра  $F_h(2\pi f)$ .

На рис. 4 для прикладу наведено енергетичні спектри випадкової послідовності  $\delta$ -імпульсів для різних значень часових меж  $x$  рівномірного розподілу випадкової величини  $v_n$ , коли середні значення  $\bar{a}_n$  і дисперсії  $\sigma_n^2$  амплітуд імпульсів однакові.

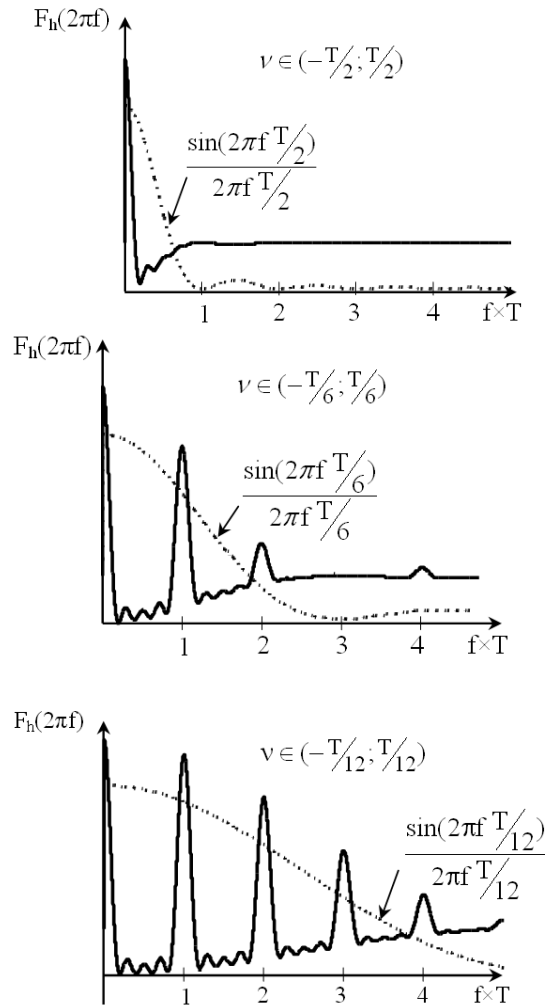


Рис. 4. Енергетичний спектр  $F_h(2\pi f)$  випадкової послідовності з п'яти  $\delta$ -імпульсів при рівномірному розподілі випадкової величини  $v_n$  в інтервалах різної довжинності

В цілому аналіз показує, що, за аналогією з ЕПР групового випромінювача, структура АЧХ мно-

лучевого РК зависит от того, есть ли среди разрешаемых локальных центров доминирующие.

В их отсутствие определять структуру АЧХ  $K(2\pi f)$  будут средний временной интервал между локальными источниками (длина тактового интервала  $T$ ) и максимальный продольный размер локальных неоднородностей (размер выборки  $2N \times T$ ). Если же доминирующие излучатели имеются, то структура АЧХ многолучевого РК будет в большей степени зависеть от параметров этих излучателей.

Анализ полученных результатов показывает, что для снижения уровня флуктуаций эхо-сигнала в МЧ РЛС необходимо, в первую очередь, чтобы в зондирующем МЧ сигнале сдвиг по частоте между частотными составляющими был обратно пропорционален тактовому интервалу, который определен как время максимальной задержки в многолучевом канале разделенное на количество разрешаемых элементов по времени.

Проведенное математическое моделирование показывает, что при использовании МЧ сигнала с одинаковыми по амплитуде частотными составляющими, согласованный подсвет позволяет уменьшить флуктуации эхо-сигнала приблизительно в корень квадратный из количества лучей распространения [1, 2].

Как показывают многочисленные результаты экспериментальных исследований [3, 4] интервал  $T$  для целей и среды распространения существенно различен. Поэтому существует возможность декомпозиции флуктуаций эхо-сигнала на флуктуации цели и среды распространения путем оптимизации параметров зондирующего сигнала и устройства его обработки. Количественная оценка снижения флуктуаций зависит от конкретной радиолокационной обстановки. Так для типичного маловысотного приморского РК выигрыш может составлять 5...7дБ.

## Выводы

Для снижения нежелательного влияния флуктуаций отраженного от цели сигнала, повышения точностных характеристик, помехозащищенности, дальности действия РЛС могут использоваться сложные, в том числе многочастотные зондирующие сигналы. При многочастотном методе локации радиолокационный канал необходимо рассматривать как многолучевой.

Анализ общих особенностей амплитудно-частотных характеристик многолучевого канала показал, что они неравномерны по амплитуде, имеют выраженные максимумы и минимумы, которые следуют периодически (квазипериодично). Данный факт должен учитываться при выборе параметров спектральной структуры МЧ зондирующего сигнала.

## Список литературы

1. Вопросы статистической теории радиолокации / П.А. Бакут, И.А. Большаков, Б.М. Герасимов и др. / Под общей ред. Г.П. Тартаковского – М.: Сов. Радио – Т. 1. – 1963. – 424 с.; Т. 2. – 1964. – 1080 с.
2. Ван-Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции / Г. Ван-Трис: пер. с англ. – М.: Сов. Радио, 1977. – Т. 3. – 662 с.
3. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы / Е.А. Штагер – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.
4. Кеннеди Р. Каналы связи с замиранием и рассеиванием / Р. Кеннеди / Перевод с англ. под ред. И.А. Овсевича. – М.: Сов. радио, 1973. – 304 с.
5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М.: Сов. радио, 1969. – 752 с.
6. Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов: О редукации к идеальному прибору в физике и технике / Г.И. Василенко. – М.: Сов. радио, 1979. – 272 с.

Поступила в редколлегию 14.08.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ПРО МОЖЛИВІСТЬ УЗГОДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДІОЛОКАЦІЙНОГО КАНАЛУ І АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНОГО СПЕКТРУ БАГАТОЧАСТОТНОГО ЗОНДУЮЧОГО СИГНАЛУ

І.Г. Леонов, А.М. Коржов, Р.М. Животовський, І.М. Пічугін

*Пропонується метод боротьби зі флуктуаціями ехо-сигналу за рахунок їх розподілу на флуктуації викликані рухом цілі і флуктуації викликані середовищем поширення радіохвиль і узгодження в частотній області характеристик багаточастотного зонduючого сигналу з характеристиками середовища поширення радіохвиль або з частотними характеристиками цілей.*

**Ключові слова:** багаточастотний зонduючий сигнал, флуктуації ехо-сигналу, характеристики радіолокаційного каналу.

## ABOUT POSSIBILITY OF CONCORDANCE OF FREQUENCY DESCRIPTIONS OF RADIO-LOCATION CHANNEL AND AMPLITUDE-FREQUENCY SPECTRUM OF MULTIFREQUENCY SOUNDING SIGNAL

I.G. Leonov, A.N. Korzhov, R.M. Zhivotovskiy, I.M. Pichugin

*The method of fight is offered against fluctuations of reflected signal due to their division on fluctuation the aims and fluctuations caused by motion the distributions of radio waves and concordance in the frequency area of descriptions of multifrequency sounding signal caused by an environment with descriptions of environment of distribution of radio waves or with frequency descriptions of aims.*

**Keywords:** multifrequency sounding signal, fluctuations of reflected signal, descriptions of radio-location channel.