

## СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭФФЕКТА МНОГОЛУЧЕВОСТИ В АППАРАТУРЕ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

к.т.н. А.Е. Казаков, С.М. Каратеева  
(представил д.т.н., проф. В.П. Деденок)

*В статье рассмотрено влияние эффекта многолучевости на качество выходной информации аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем. Предложен способ компенсации этого явления.*

**Постановка проблемы.** При приеме сигналов от навигационных спутников проявляется эффект интерференции прямого и переотраженных от окружающих антенну предметов сигналов. Это явление получило название многолучевости. Суммарные ошибки из-за влияния многолучевости могут достигать величин единиц метров для кодовых измерений и единиц сантиметров – для фазовых. В наиболее худших случаях многолучевая помеха может вызвать сбой и перерывы в слежении за спутниками.

**Целью статьи** является разработка алгоритма компенсации влияния эффекта многолучевости в приемниках спутниковых радионавигационных систем.

Принцип воздействия эффекта многолучевости пояснен на рис. 1 и может быть оценен с использованием соотношения (1):

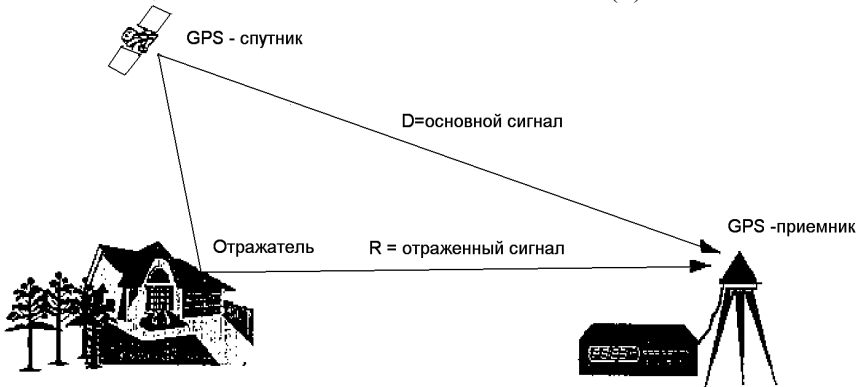


Рис. 1. Влияние эффекта многолучевости

$$\operatorname{tg} \Delta\phi_m = \frac{\beta \cdot \sin \Delta\phi}{1 + \cos \Delta\phi}, \quad (1)$$

где  $\Delta\phi_m$  – фазовый сдвиг несущей объединенного сигнала, полученного в приемнике в результате интерференции за счет многолучевости;  $\Delta\phi$  – фазовый сдвиг отраженного сигнала относительно прямого;  $\beta$  – фактор, который изменяется между 0 (нет отражения) и 1 (отражаемый сигнал, столь же сильный как прямой сигнал).

В наиболее общем случае навигационный приемник принимает множество отраженных сигналов вместе с прямым сигналом от спутника [1, 2]. Эти отраженные сигналы влияют на выходной сигнал приемника. Рассмотрим более подробно влияние эффекта многолучевости на фазу несущей принимаемого навигационного сигнала.

Сложный сигнал на входе в приемник может быть представлен следующим выражением:

$$s(t) = d(t) \cdot c(t) A \sum_{i=0}^n \alpha_i \cos\left(2\pi f_L t + \theta_0 + \frac{2\pi d_i}{\lambda}\right), \quad (2)$$

где  $d(t)$  – бит данных навигационного сообщения;  $c(t)$  – C/A код сигнала GPS;  $A$  – амплитуда сигнала на несущей частоте;  $\alpha_i$  – коэффициенты прямого и отраженных сигналов;  $f_L$  – несущая частота сигнала GPS;  $d_i$  – задержка сигнала относительно прямого сигнала GPS,  $\lambda$  – длина волны сигнала GPS;  $\theta_0$  – начальная фаза.

В выражении (1) коэффициенты  $\alpha_i$  и  $d_i$  изменяются во времени и для прямого сигнала принимают значения  $i = 0$ ,  $d_0 = 0$  и  $\alpha_0 = 1$ .

Пренебрегая влиянием бита навигационных данных можно записать выражение для фазы сигнала на выходе дискриминатора [3]:

$$\psi = \arctan \left( \frac{\sum_{i=0}^n R(\tau - \delta_i) \cdot \alpha_i \sin\left(\psi_{\text{ист}} + \frac{2\pi d_i}{\lambda}\right)}{\sum_{i=0}^n R(\tau - \delta_i) \cdot \alpha_i \cos\left(\psi_{\text{ист}} + \frac{2\pi d_i}{\lambda}\right)} \right), \quad (3)$$

где  $R(\tau)$  – корреляционная функция;  $\delta_i$  – задержка сигнала из-за многолучевости;  $\psi_{\text{ист}}$  – истинная фаза сигнала.

При отсутствии отраженных сигналов выражение (2) сводится к  $\psi = \psi_{\text{ист}}$ , т.е. измеренная фаза сигнала равна истинной фазе. Когда отраженные сигналы присутствуют, то измеренную фазу можно представить как  $\psi = \psi_{\text{ист}} - \Delta\psi$ .

Рассмотрим некий виртуальный отражатель с изменяющимися во времени параметрами (коэффициентом отражения и пространственным местом расположения), который будет эквивалентом всех отражений в окрестности приемной антенны. Тогда влияние всех отраженных сигналов может быть представлено как результат отражения от этого единственно-

го виртуального отражателя. Изменение параметров отражения виртуального отражателя может быть выражено как функция времени, которая определяет многолучевые ошибки в виде

$$\Delta\psi = \psi_{\text{ист}} - \psi(t) = \arctan\left(\frac{R(\tau - \delta(t)) \cdot \alpha(t) \sin \gamma(t)}{R(\tau) - R(\tau - \delta(t)) \cdot \alpha(t) \sin \gamma(t)}\right), \quad (4)$$

где  $\gamma(t)$  – фаза сложного отраженного сигнала.

Разделив числитель и знаменатель уравнения (4) на корреляционную функцию и обозначив

$$\alpha_1(t) = \frac{R(\tau - \delta(t)) \cdot \alpha(t)}{R(\tau)},$$

можно получить следующее выражение для разности фаз:

$$\Delta\psi = \frac{\alpha_1(t) \sin \gamma(t)}{1 + \alpha_1(t) \cos \gamma(t)}. \quad (5)$$

Выражение (5) определяет соотношение между ошибкой определения фазы сигнала из-за многолучевости  $\Delta\psi$ , коэффициентом отраженного сигнала  $\alpha_1$  и фазой отраженного сигнала  $\gamma(t)$ .

В ситуации, когда несколько приемных антенн расположены в близком удалении друг относительно друга, отраженные сигналы на входе каждой из антенн будут сильно коррелированными, а разность ошибок определения фазы на 2-х, близко расположенных антеннах, из-за влияния многолучевости будет определяться как

$$\Delta\psi_0 - \Delta\psi_1 = \arctan\left(\frac{\alpha_1(t) \sin \gamma_0(t) - \alpha_1(t) \sin \gamma_1(t) + \alpha_1^2(t) \sin(\gamma_0(t) - \gamma_1(t))}{1 + \alpha_1(t) \cos \gamma_0(t) - \alpha_1(t) \cos \gamma_1(t) + \alpha_1^2(t) \cos(\gamma_0(t) - \gamma_1(t))}\right),$$

где индексы 0 и 1 относятся соответственно к антеннам 0 и 1.

Данная модель может быть использована для разработки специального фильтра компенсации эффекта многолучевости, так как эта модель устанавливает связь между реальными измерениями и статическими параметрами, требующими оценки.

В настоящее время одним из направлений, связанных с алгоритмическими методами снижения воздействия эффекта многолучевости, может быть сглаживание кодовых псевдодалностей фазовыми.

Основываясь на представлении влияния многолучевости [4], предлагается следующая методика оценки и компенсации данного вида пассивной помехи. Некий виртуальный отражатель представляет собой суммированное влияние всех окружающих антенну отражателей и моделируется как единственный эквивалентный элемент.

Из-за значительного расстояния до навигационного спутника, направления прихода его сигналов на две близко разнесенные в пространстве антенны можно предположить параллельными. Таким образом, плоский

фронт волны будет иметь одно и то же значение фазы. После отражения от плоского виртуального отражателя сигналы остаются параллельными, а изменение фазы определяется дополнительным смещением плоского фронта волны. По этой причине фаза отраженного сигнала, принимаемого на близко расположенные антенны, будет являться функцией направления отраженного сигнала (т.е. азимута и угла места на предмет переотражения), а также относительной геометрии расположения антенн.

На рис. 2 представлена иллюстрация геометрии приема переотраженного сигнала на две антенны, размещенные в точках Ант 0 и Ант 1.

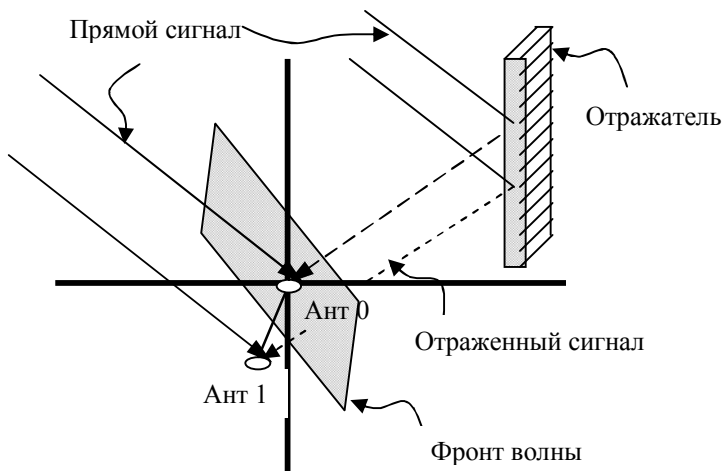


Рис. 2. Геометрия приема переотраженного сигнала на две антенны

Каждая из антенн принимает прямой сигнал от спутника и отраженные сигналы от близкорасположенного плоского объекта. Фаза сигнала на входе антенны Ант 1 по сравнению с фазой на входе Ант 2 может быть представлена как

$$\gamma = \gamma_0 + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{a_{01} \cdot \cos(\varphi_0 - \varphi_{01})}{\cos \theta_0}, \quad (6)$$

где  $\gamma_0$  – фаза сигнала на антенне Ант 0;  $a_{01}$  – расстояние между антеннами;  $\varphi_0$  – азимут вектора 0 – 1;  $\theta_0$  – угол места отраженного сигнала.

Если значение фазы и направление отраженного сигнала известны для антенны Ант 0, то фаза сигнала на входе антенны Ант1 может быть вычислена исходя из известной геометрии между ними. Соотношение (6) может быть использовано для оценки фазы отраженного сигнала в конструктивном блоке близко расположенных антенн. При этом с увеличением числа антенных элементов увеличивается число неизвестных в общей системе уравнений.

Параметры отраженного сигнала могут быть оценены с использованием расширенного фильтра Кальмана. При этом все параметры отраженного сигнала определяются относительно места расположения опорной (референсной) антенны (антенна в центре конструкции). Для отраженного сигнала определяется следующий вектор состояния [3]:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \gamma_0 \\ \theta_0 \\ \varphi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{коэффициент } \tau \text{ отражения} \\ \text{фаза отраженного сигнала на эталонной антенне} \\ \text{угол места отраженного сигнала} \\ \text{азимут отраженного сигнала} \end{bmatrix}.$$

Вектор измерений фильтра Калмана формируется как

$$[\Delta\Psi_{0,1} \dots \Delta\Psi_{0,m-1}]^T,$$

где  $m$  – число антенн в антенном блоке;  $\Delta\Psi_{0,1}$  – разность фаз между антеннами 0 и 1.

Отношение между вектором состояния переменных и вектором измерений определяется следующей матрицей:

$$\begin{bmatrix} \frac{\delta(\Delta\Psi_{0,1})}{\delta\alpha} & \frac{\delta(\Delta\Psi_{0,1})}{\delta\gamma_0} & \frac{\delta(\Delta\Psi_{0,1})}{\delta\theta_0} & \frac{\delta(\Delta\Psi_{0,1})}{\delta\varphi_0} \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ \frac{\delta(\Delta\Psi_{0,m-1})}{\delta\alpha} & \frac{\delta(\Delta\Psi_{0,m-1})}{\delta\gamma_0} & \frac{\delta(\Delta\Psi_{0,m-1})}{\delta\theta_0} & \frac{\delta(\Delta\Psi_{0,m-1})}{\delta\varphi_0} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Представленный фильтр используется для оценки параметров виртуального отражателя, влияющего на фазовые измерения сигнала спутника на входе каждой из антенн в антенном блоке. При этом требуется один фильтр для каждого спутника, чтобы откорректировать в приемнике фазу сигнала. Амплитуда отраженного сигнала на всех антеннах в блоке предполагается одинаковой и также может быть оценена. После получения всех выше перечисленных параметров может быть вычислена ошибка, принимаемой фазы сложного сигнала и из-за влияния эффекта многолучевости.

Следует отметить, что представленный алгоритм работоспособен только в том случае, когда отраженные сигналы коррелированы между собой для каждой из антенн блока. Для получения такого результата конструкция блока должна представлять собой близкорасположенные антенны, закрепленные на жесткой неподвижной платформе.

С учетом вышеизложенного, а также анализа влияния многолучевости на функционирование навигационных приемников можно предложить следующие рекомендации по защите от данного вида пассивной помехи:

- перед размещением навигационных приемников на местности должен быть выполнен выбор положения приемной антенны;
- использоваться специальные антенны высокого качества, расположенные на максимально возможном возвышении;
- могут использоваться специальные антенны, формирующие диаграмму направленности с учетом местного окружения (провалы диаграммы направленности в направлении прихода переотраженных сигналов);
- могут использоваться приемники, осуществляющие внутреннюю оценку многолучевости и ее подавление;
- в навигационных приемниках могут принудительно быть ограничены углы визирования на навигационные спутники (углы места);
- при расчете псевдодалностей может выполняться усреднение результатов за некоторый период времени, что с учетом повторяемости воздействия многолучевости даст снижение ее воздействия.

**Выводы.** Таким образом, основным, полученным в данной статье научным и практическим результатом, является разработанный алгоритм борьбы с эффектом многолучевости, который целесообразно применять при проведении предварительных организационных и технических мероприятий по рекогносцировке мест дислокации навигационных приемников, особенно их приемных антенн. Приведены рекомендации по защите от данного вида пассивной помехи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / Г.И. Тузов, В.А. Сивов, В.И. Прытков, Ю.Ф. Урядников, Ю.А. Дергачов; Под ред. Г.И. Тузова. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
2. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): Теорія і практика / Гофманн-Велленгоф Б., Ліхтенеггер Г., Колинз Д.; Пер. з англ. під ред. Я.С. Яцківа. – К.: Наук. думка, 1995. – 380 с.
3. Тучин Д.А. Кодовые измерения псевдодалности системы GPS. Модель ошибок и априорная оценка точности определения вектора положения. – М.: Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, РАН. – 2002. – 17 с.
4. Ray J.K., Cannon M.E., Fenton P. Mitigation of Static Carrier Phase Multipath Effects Using Multiple Closely-Spaced Antennas // Proceedings of ION GPS'98. – Nashville, USA. – September 15 – 16, 1998. – 11 p.

Поступила 23.11.2004

**КАЗАКОВ Александр Евгеньевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела Объединенного научно-исследовательского института Вооруженных Сил. В 1994 году окончил ВИРТА ПВО им. Л.А. Говорова. Область научных исследований – системы и комплексы спутниковой навигации.

**КАРАТЕЕВА Светлана Михайловна**, старший научный сотрудник Объединенного научно-исследовательского института Вооруженных Сил. Область научных исследований – системы и комплексы спутниковой навигации.