УДК 621.396.96

А.С. Вершинин, Е.П. Ворошилин, В.П. Денисов

Экспериментальная оценка увеличения точности измерения задержки сигнала в наземных системах радиомониторинга при многоканальном приеме

Рассмотрены два метода многоканальной обработки, позволяющие повысить точность определения задержки сигнала. Задержка сигнала определялась пороговым методом на уровне порога обнаружения. Проведена обработка экспериментальных данных, получены статистические характеристики оценки времени задержки радиоимпульсного сигнала. Ключевые слова: задержка, момент прихода, отношение сигнал/шум, многоканальная обработка, пороговый метод, эталонный канал, точность.

Для определения координат источника радиоизлучения в системах радиомониторинга обычно применяют угломерный, разностно-дальномерный методы либо результат их комплексирования. Информативными параметрами в таких системах являются направление на источник сигнала и время задержки. Системы пеленгования, как правило, имеют несколько приемных каналов. Сигналы с выходов этих каналов можно использовать для определения времени задержки с последующим определением координат источника радиоизлучения (ИРИ) разностно-дальномерным методом. Возникает задача наиболее полного использования информации от совокупности приемных каналов для повышения точности угломерно-разностно-дальномерных измерений.

Существуют две причины, позволяющие говорить о возможном увеличении точности определения задержки сигнала при многоканальном приеме:

– увеличение отношения мощности принимаемого сигнала к мощности собственных шумов приемных устройств;

– формирование с помощью антенной решетки направленной диаграммы приема, ориентированной главным максимумом на источник сигнала, что позволяет уменьшить влияние многолучевости.

Предположим, что в состав станции мониторинга входит фазовый пеленгатор, антенная система которого содержит N приемных антенн $A_0, A_1, ..., A_{N-1}$, образующих линейную решетку.

Предположим также, что принимаемые сигналы импульсные, система обработки сигналов цифровая. Амплитуды и фазы сигналов с выходов каждого из приемных каналов записываются в память ЭВМ с привязкой по времени, где хранятся в течение всего времени обработки. Интервал временной дискретизации сигналов значительно меньше длительности принимаемых импульсов. Запись сигналов может быть выполнена в виде квадратурных составляющих, например, как это сделано в работе [1].

В процессе обработки сигналов сначала по (*N*-1) измеренным разностям фаз устраняется неоднозначность измерений и вычисляется пеленг на ИРИ [2]

$$lpha^* = \arcsin \sum_{i=1}^{N-1} (\phi_i + 2\pi k_i) g_i$$
 ,

где φ_i – разность фаз на *i*-й базе; k_i – целое число периодов разности фаз на *i*-й базе; α – угол прихода волны относительно нормали к антенной системе.

Поскольку разности фаз ϕ_i определяются с погрешностями как за счет неидеальности среды распространения радиоволн, так и за счет неидеальности измерительной аппаратуры, оценка α^* не ровна истинному значению угла прихода α .

В процессе дальнейшей обработки сигналов синтезируется диаграмма направленности антенной решетки, главный максимум которой ориентирован под углом α^{*} к ее нормали.

Синтез заключается в суммировании сигналов с выходов приемных каналов, в которых вводятся фазовые сдвиги, так чтобы выполнялись соотношения

$$\varphi_{i\phi B} - \varphi_{j\phi B} = \frac{2\pi}{\lambda} (x_j - x_i) \sin \alpha^*,$$

где $\phi_{i\phi B}$, $\phi_{j\phi B}$ – вносимые фазовые сдвиги; x_i , x_j – координаты антенн.

Амплитуда суммарного сигнала на выходе антенной решетки в *n*-м временном дискрете может быть представлена формулой

$$U_{\text{IJCC}}(n) = \sqrt{\left(\sum_{i=0}^{N-1} A_i(n) \cos(\varphi_i - \varphi_{i \oplus B})\right)^2 + \left(\sum_{i=0}^{N-1} A_i(n) \sin(\varphi_i - \varphi_{i \oplus B})\right)^2} =$$

$$=\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \left(Ac_{i}\left(n\right)\cos\varphi_{i\varphi_{B}}+As_{i}\left(n\right)\sin\varphi_{i\varphi_{B}}\right)^{2}+\sum_{i=0}^{N-1} \left(As_{i}\left(n\right)\cos\varphi_{i\varphi_{B}}-Ac_{i}\left(n\right)\sin\varphi_{i\varphi_{B}}\right)^{2}},$$

где $A_i(n)$, $Ac_i(n)$, $As_i(n)$ – значение огибающих в момент дискрета *n* в *i*-м канале. Аббревиатура ДСС означает додетекторное суммирование сигналов.

Ориентация главного лепестка диаграммы направленности на ИРИ минимизирует уровень отраженных сигналов по отношению к прямому и, следовательно, трассовую составляющую погрешности измерения временной задержки. В данном случае «поведение» максимума диаграммы на ИРИ вычислено неточно за счет погрешностей фазовых измерений: оценка пеленга α^* не равна его истинному значению. По этой же причине суммируемые сигналы не синфазны.

Очевидно, что наибольшего отношения сигнал-шум можно добиться при синфазном суммировании сигналов с выходов элементов антенной решетки. Если шумы в каждом из каналов взаимно независимы, то при синфазном суммировании сигналов (ССС) отношение $2E/N_0$ (E – энергия сигнала за время измерения; N_0 – спектральная плотность мощности шума) увеличивается в N раз. Во столько же раз уменьшается теоретически предельная дисперсия оценки временного запаздывания радиоимпульса, обусловленная влиянием шумов, поскольку определяется формулой [3]

$$\sigma_{\tau^*}^2 = \left[(2E/N_0)(2\pi)^2 \right]^{-1}.$$

Другим возможным вариантом объединения каналов является последетекторное суммирование сигналов (ПСС). Алгоритм ПСС определяется выражением $U_{\Sigma}(n) = \sum_{i=1}^{N} U_i(n)$,

где $U_{\Sigma}(n)$ – результат последетекторного суммирования; $U_i(n)$ – амплитуда сигнала в *i*-м канале.

С точки зрения энергетических соотношений метод ПСС подобен методу последетекторного накопления пачки из N радиоимпульсов в одноканальных РЛС. Эффективность этого метода зависит от отношения «сигнал/шум» (ОСШ) на входах детекторов и количества каналов, участвующих в суммировании.

В результате объединения каналов приема тем или иным способом формируется видеоимпульс, временное положение которого надо определять. Одним из эффективных способов определения задержки сигнала в условиях многолучевости является использование порогового измерителя, фиксирующего момент его обнаружения [4]. Измеритель формирует оценку задержки прихода сигнала по оцифрованным отсчетам его огибающей. Алгоритм работы описывается условием

$$s(i) > p \cap s(i+1) > p \cap \dots \cap s(i+N_{OK}) > p, \qquad (1)$$

где s(i), s(i+1), ..., $s(i+N_{\rm OK})$ – отсчеты огибающей сигнала в дискретные моменты времени; p – пороговый уровень; \cap – логическая операция «И», i – моменты времени; $N_{\rm OK}$ – длительность окна анализа; i и $N_{\rm OK}$ измеряются числом тактов аналого-цифрового преобразователя.

Все отсчеты сигнала последовательно, начиная с первого, проверяются на предмет истинности условия (1). Если в некоторый момент времени *i* условие (1) выполняется, то за оценку времени задержки сигнала принимается величина *i*. Точность определения $\hat{t}_{\rm np}$ пороговым измерителем зависит от ОСШ, формы огибающей сигнала и ее искажений на трассе распространения радиоволн.

Для оценки эффективности алгоритмов многоканальной обработки в реальных условиях использовались экспериментальные данные, которые были получены НИИ радиотехнических систем (РТС) ТУСУРа в трехсантиметровом диапазоне волн в период 2007– 2009 гг. Излучались прямоугольные радиоимпульсы длительностью 0,3 мкс. Приемная антенная система состоит из 4 рупоров с шириной диаграммы направленности 10° в горизонтальной плоскости и разносом крайних антенн на 90 см. Описание комплекса аппаратуры приведено в [4]. Описание структуры и объема экспериментальных данных приведено в [5].

Экспериментальные записи импульсных сигналов, полученные на различных трассах, позволяют оценить временное запаздывание сигнала в каждом из пространственно разнесенных каналов в отдельности.

На рис. 1 приведены примеры огибающих радиоимпульсных сигналов с выходов каждого из четырех пространственно разнесенных приемных каналов, результаты их додетекторного, синфазного и последетекторного накопления.



Рис. 2. Примеры огибающих сигналов при приеме по главному лепестку ДН: a – ошибка пеленгования 1,25°, δ – ошибка пеленгования 0,1°

Из рис. 1, *а* следует, что ДСС при больших ошибках пеленгования приводит к суммированию «расфазированных» сигналов. Следствием этого является ухудшение ОСШ по сравнению с синфазным суммированием. На рис. 1, δ показан случай, когда направление на источник излучения определяется с малой ошибкой. В результате выигрыш в ОСШ при ДСС близок к теоретическому пределу.

Характеристиками, удобными для экспериментальной оценки увеличения точности определения момента прихода при многоканальном приеме, являются математическое ожидание, СКО и полная среднеквадратическая ошибка (ПСКО) оценки момента прихода, которая вычисляется по формуле

$$\sigma_{\Pi \text{CKO}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} \left(\hat{t}_i - t_{\text{HCT}}\right)^2} ,$$

где t_i — оценка момента прихода в *i*-й реализации; $t_{\rm ист}$ — истинное значение момента прихода; N — количество реализаций; $\sigma_{\rm ПСКО}$ — полная среднеквадратическая ошибка оценки момента прихода.

В ходе исследования статистической обработке подвергались оценки моментов прихода следующих импульсных сигналов:

- с выхода одного из приемных каналов («Один»);

- полученного схемой ДСС с выходов 4 каналов приема («ДСС»);

– полученного схемой ДСС с выходов 4 каналов приема, с использованием истинного значения пеленга на источник излучения («ССС»).

- полученного схемой ПСС с выходов 4 каналов приема («ПСС»).

Сравнение проводилось на открытой и закрытой трассах при наведении направленной антенны передатчика на приемный пункт. Отношения сигнал/шум достигали 15 дБ для закрытой трассы и до 25 дБ – для открытой. Результаты обработки приведены в таблице.

Характери- стики	Открытая трасса				Закрытая трасса			
	Один	ПСС	ДСС	CCC	Один	ПСС	дсс	CCC
ПСКО, нс	12,2	10,9	10,0	10,0	18,6	15,0	14,1	13,9
С/Ш, ед.	223,13	446,03	435,48	435,74	26,07	46,36	46,41	45,95

Статистические характеристики оценок момента прихода

Из таблицы следует, что использование многоканальной обработки приводит к увеличению точности оценки временного запаздывания сигнала, которая зависит от алгоритма обработки. В условиях эксперимента при N = 4, дискретной обработке с тактом 11 нс и неидентичных приемных каналах выигрыш в СКО по сравнению с наилучшим каналом составил 3...5 нс как при измерении в максимуме синтезированной диаграммы, так и при последетекторном суммировании сигналов. Выигрыш возрастет, если приемные каналы будут статистически идентичными.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от «07»сентября 2010 г. в порядке реализации Постановления № 218 Правительства РФ.

Литература

1. Ровкин М.Е. Влияние канала распространения сигнала на погрешности определения координат пассивными разностно-дальномерными методами на тропосферных трассах большой протяженности: дис. ... канд. техн. наук: / Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. – Томск, 2004. – 160 с.

2. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2001. – 251 с.

3. Дулевич В.Е. Теоретические основы радиолокации. – М.: Сов. радио, 1978. – 608 с.

4. Мещеряков А.А. Экспериментальное обоснование и разработка методов повышения точности разностно-дальномерных пассивных радиолокационных систем наземного базирования: дис. ... канд. техн. наук: / Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники. – Томск, 2004. – 156 с.

5. Ворошилин Е.П. Экспериментальная оценка импульсной реакции канала распространения радиоволн в сантиметровом диапазоне / Е.П. Ворошилин., В.Ю. Лебедев // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2008. – № 2(18). – С. 7–11.

Вершинин Александр Сергеевич

Аспирант каф. радиотехнических систем ТУСУРа Тел.: 8-913-804-94-64 Эл. почта: vershkoff@sibmail.com

Ворошилин Евгений Павлович

Канд. техн. наук, зав. каф. телекоммуникации основ радиотехники ТУСУРа Тел.: 8-(382-2)-41-36-70 Эл. почта: nvi@sibmail.com

Денисов Вадим Прокопьевич

Д-р техн. наук, проф. каф. радиотехнических систем ТУСУРа Тел.: 8-(382-2) 41-38-69 Эл. почта: dvp@ms.tusur.ru

Vershinin A.S., Voroshilin E.P., Denisov V.P. Experimental estimation of accuracy enhancement of signal delay measurement in ground-based radio-monitoring multichannel processing systems

Two methods of the multichannel processing, which allow to enhance the determination accuracy of the signal delay, are considered. The time delay of a signal has been found with the use of threshold method at the level of detection threshold. The experimental results have been processed, and the statistical characteristics of the estimates of radiofrequency pulse signal delay have been obtained.

Keywords: time delay, arrival time, signal/noise ratio, multichannel processing, threshold method, reference channel, accuracy.