

УДК 621.396

*Вадим Иванович Слюсар,
Николай Александрович Масесов,
Сергей Владимирович Волошко,
Игорь Иванович Слюсар,
Андрей Александрович Зинченко*

МЕТОД КОРРЕКЦИИ НЕИДЕНТИЧНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ КАНАЛОВ ПРИЕМА СИГНАЛОВ

Постановка задачи и ее связь с важными научными и практическими заданиями. Постоянно возрастающие потребности пользователей в передаче больших объемов информации с одной стороны, и ограниченность частотного ресурса с другой заставляют производителей средств связи, в том числе двойного назначения, все чаще применять специальные методы разнесения сигналов для увеличения скорости передачи информации.

Одним из способов повышения пропускной способности систем связи без расширения задействованной полосы частот является использование поляризационного разделения каналов. Однако при этом возможен переход энергии из одного поляризационного канала в другой, что приводит к возникновению ошибок демодуляции сигналов в приемном тракте и требует решения проблемы их устранения.

Анализ последних исследований и публикаций. Формулировка целей статьи. Следует уточнить, что применение ортогональной поляризации предусматривает использование независимых каналов, которые работают на одной и той же частоте и на одной и той же трассе распространения. Теоретически это обеспечивается 90-градусным сдвигом фаз колебаний ортогональных поляризаций. В то же время, использование сигналов двойной поляризации может быть усложнено тем, что помимо мощности, принимаемой на основной поляризации, в нагрузке выделяется также мощность токов, наведенных в антенне по ортогональной поляризационной компоненте поля, которая называется кроссполяризационной [1]. По сути, кроссполяризационная компонента является мешающей для приема полезных сигналов и должна тщательно контролироваться. Это явление, которое обычно называется кроссполяризацией, может быть вызвано двумя основными группами факторов. Первая группа — влияние атмосферы на распространение радио-

волн (гидрометеоры, многолучевость и т. п.). Вторая — это всегда присутствующие неидентичности характеристик антенны и элементной базы прохождения и обработки поляризованных каналов. Влияние первой группы факторов устраняется, обычно, выбором диаграммы направленности антенн, адаптивными и другими методами, описанными в рекомендациях МСЭ-Р (Рекомендация Р.310) [1]. Однако в условиях возможных замираний, которыми характеризуются радиоканалы, кроссполяризационные компоненты второй группы становятся основными факторами, влияющими на работу системы в целом.

В статье предлагается новый подход к выполнению коррекции поляризационной неидентичности, который отличается применением дополнительного стробирования отсчетов аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Метод позволит формировать поляризационные каналы с высокой идентичностью их характеристик, что создает основу для применения в системах связи сигналов М-ичной поляризационной или квадратурной амплитудной модуляций высоких порядков. В то же время, использование дополнительного стробирования отсчетов напряжений позволяет согласовать быстродействие высокоскоростных АЦП в каналах приемной цифровой антенной решетки (ЦАР) с более низкоскоростными устройствами последующей обработки сигналов [2].

Изложение основного материала. Сущность предлагаемого метода состоит в принятии одного из поляризационных каналов в качестве эталонного, тогда как относительно другого канала, который рассматривается в качестве разбалансированного, проводится дополнительная коррекция амплитуды и фазы исходных сигналов. Оценка амплитудной и фазовой неидентичностей осуществляется путем их расчета во время подачи контрольного сигнала на входы поляризационных каналов.

Важно отметить, что период дискретизации АЦП τ_{ADC} следует выбирать таким образом, чтобы обеспечить соотношение следующего вида:

$$f = \frac{2i + 1}{4} \frac{1}{\tau_{ADC}},$$

где f — центральная частота сигнала, i — номер временного отсчета, $i=0, 1, 2, \dots$

Будем считать, что в полосе приема сигналов зависимостью амплитудной и фазовой неидентичностей поляризационных каналов от частоты можно пренебречь. Такое ограничение можно обеспечить, например, при использовании сигналов с неортогональной частотной дискретной модуляцией (N-OFDM) [3], занимающих меньшую спектральную полосу, чем сигналы OFDM.

Примем в дальнейших расчетах, что

$$f = \frac{5}{4} \frac{1}{\tau_{ADC}}. \quad (1)$$

Значения напряжений отсчетов на выходах АЦП приемных поляризационных каналов можно представить в виде:

$$U_H(i) = a \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot i \cdot \tau_{ADC} + \varphi), \quad (2)$$

$$U_V(i) = (1 + \delta a) \cdot a \times \sin\left(2\pi \cdot f \cdot i \cdot \tau_{ADC} + \left(\frac{\pi}{2} + \Delta\varphi\right) + \varphi\right), \quad (3)$$

где $U_H(i), U_V(i)$ — временные выборки АЦП на выходе приемных каналов горизонтальной и вертикальной поляризаций;

a, φ — амплитуда и начальная фаза сигнала, соответственно;

δa — абсолютное значение неидентичности по амплитуде сигналов поляризационных каналов;

$\Delta\varphi$ — отклонение разности фаз сигналов разных поляризаций от 90° .

Важным этапом реализации метода является подача на входы АЦП поляризационных каналов контрольного сигнала с частотой f_c , соответствующей выражению (1). Амплитуду и начальную фазу контрольного сигнала обозначим, соответственно, a_c и φ_c .

Выберем в качестве эталонного канал с горизонтальной поляризацией и будем считать, что он свободен от кроссполяризационной помехи. Тогда выходное напряжение i -го временного отсчета АЦП эталонного поляризационного канала при подаче контрольного сигнала на основании (1) и (2) можно записать в виде:

$$H(i) = p_H + a_c \cdot \cos\left(\pi \frac{5}{2} i + \varphi_c\right), \quad (4)$$

где a_c, φ_c — амплитуда и начальная фаза контрольного сигнала, соответственно;

f_c — частота контрольного сигнала,

p_H — значение возможной постоянной составляющей напряжения в канале.

В этом случае, как упоминалось выше, в напряжениях второго поляризационного канала будут сосредоточены амплитудные и фазовые неидентичности коэффициентов передачи поляризационных каналов, вызванные кроссполяризационной помехой, что можно отобразить в виде:

$$V(i) = p_V + a_c \cdot (1 + \delta a) \cdot \sin\left(\pi \frac{5}{2} i + (\varphi_c - \Delta\varphi)\right), \quad (5)$$

где p_V — значение возможной постоянной составляющей напряжения в разбалансированном канале.

Следующим этапом реализации метода является выполнение процедуры дополнительного стробирования отсчетов АЦП. Согласно [2], дополнительное стробирование отсчетов АЦП осуществим в данном случае по формулам:

$$\begin{aligned} H1 &= U_H(0) - U_H(2) + U_H(4) - \dots - U_H(N-2), \\ H2 &= U_H(1) - U_H(3) + U_H(5) - \dots - U_H(N-1), \\ V1 &= U_V(0) - U_V(2) + U_V(4) - \dots - U_V(N-2), \\ V2 &= U_V(1) - U_V(3) + U_V(5) - \dots - U_V(N-1), \end{aligned} \quad (6)$$

где N — период накопления, $H1, H2, V1, V2$ — напряжения, соответствующие двум соседним во времени стробам по выходам двух поляризационных каналов.

Видно, что в этом случае соответствующая обработка сводится к сепарации дискретных выборок напряжений по признаку четности номера поступления. При этом осуществляется раздельное накопление четных и нечетных элементов массивов с инверсией знака от одного отсчета к другому. Как следствие указанной процедуры дополнительного стробирования, устраняется постоянное смещение сигналов и, без учета действия шумов, получим:

$$\begin{aligned} H1 &= \frac{N}{2} a_c \cdot \cos(\varphi_c), \\ H2 &= -\frac{N}{2} a_c \cdot \cos(\varphi_c), \\ V1 &= \frac{N}{2} a_c \cdot (1 + \delta a) \cdot \sin(\varphi_c - \Delta\varphi), \\ V2 &= \frac{N}{2} a_c \cdot (1 + \delta a) \cdot \cos(\varphi_c - \Delta\varphi). \end{aligned} \quad (7)$$

В случае отсутствия поляризационных неидентичностей, т. е. $\delta a = 0$ и $\Delta\varphi = 0$, значения $V1$ и $V2$ будут иметь вид:

$$\begin{aligned} V1 &= \frac{N}{2} a_c \cdot \sin(\varphi_c), \\ V2 &= \frac{N}{2} a_c \cdot \cos(\varphi_c). \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом приведенных выкладок, для пары соседних во времени отсчетов $H1$ и $H2$ эталонного канала, полученных в результате процедуры дополнительного стробирования, будет справедливо следующее выражение:

$$H1^2 + H2^2 = \frac{N^2 a_c^2}{4}. \quad (10)$$

Аналогічно, для второго поляризаційного каналу буде мати місце:

$$V1^2 + V2^2 = \frac{N^2 a^2}{4} \cdot (1 + \delta a)^2. \quad (11)$$

Підставив (10) в (11), несложно получить оценку амплитудной составляющей поляризаційной неидентичности после дополнительного стробирования отсчетов АЦП:

$$\delta a = \sqrt{\frac{V1^2 + V2^2}{H1^2 + H2^2}}. \quad (12)$$

Путем несложных математических преобразований из (7) можно получить:

$$V1 = (1 + \delta a) \cdot (-H2 - H1 \cdot \text{tg}(\Delta\varphi)) \cos(\Delta\varphi),$$

$$V2 = (1 + \delta a) \cdot (H1 - H2 \cdot \text{tg}(\Delta\varphi)) \cos(\Delta\varphi).$$

Разделив V1 на V2, получим:

$$\frac{V1}{V2} = \frac{-H2 - H1 \cdot \text{tg}(\Delta\varphi)}{H1 - H2 \cdot \text{tg}(\Delta\varphi)},$$

или

$$\text{tg}(\Delta\varphi) = \frac{V1 \cdot H1 + V2 \cdot H2}{V1 \cdot H2 - V2 \cdot H1}.$$

Таким образом, для оценки фазовой неидентичности поляризаційных каналов имеем формулу:

$$\Delta\varphi = \text{arctg}\left(\frac{V1 \cdot H1 + V2 \cdot H2}{V1 \cdot H2 - V2 \cdot H1}\right), \quad (13)$$

которая уместна при выполнении условия $V1 \cdot H2 - V2 \cdot H1 \neq 0$.

Для нахождения алгоритма коррекции примем в качестве цели его применения получение таких откорректированных значений $V1_{\text{кор}}$ и $V2_{\text{кор}}$ откликов разбалансированного канала процедуры дополнительного стробирования, которые бы соответствовали идеальным значениям (8) и (9), т. е. примем что

$$V1_{\text{кор}} = \frac{N}{2} a \cdot \sin(\varphi), \quad V2_{\text{кор}} = \frac{N}{2} a \cdot \cos(\varphi).$$

Представим отклик строга V1 (7) искаженного канала в развернутой записи:

$$\begin{aligned} V1 &= \frac{N}{2} a (1 + \delta a) \sin(\varphi_c - \Delta\varphi) = \\ &= (1 + \delta a) \frac{N}{2} a (\sin(\varphi_c) \cos(\Delta\varphi) - \cos(\varphi_c) \sin(\Delta\varphi)) = \\ &= (1 + \delta a) V1_{\text{кор}} \cos(\Delta\varphi) - (1 + \delta a) H1 \sin(\Delta\varphi) \end{aligned}$$

Отсюда,

$$V1_{\text{кор}} (1 + \delta a) \cos(\Delta\varphi) = V1 + (1 + \delta a) H1 \sin(\Delta\varphi).$$

Итак, алгоритм коррекции разбаланса может быть записан в виде:

$$V1_{\text{кор}} = H1 \cdot \text{tg}(\Delta\varphi) + \frac{V1}{(1 + \delta a) \cos(\Delta\varphi)}. \quad (14)$$

Аналогичным образом можно доказать, что

$$V2_{\text{кор}} = H2 \cdot \text{tg}(\Delta\varphi) + \frac{V2}{(1 + \delta a) \cos(\Delta\varphi)}. \quad (15)$$

Практическая реализация метода коррекции неидентичности поляризаційных каналов сводится к применению в приемнике информационного сообщения программируемых матриц логических элементов, например, фирмы *Xilinx*. С их помощью будет выполняться предусмотренные методом операции над полученными в результате аналого-цифрового преобразования цифровыми напряжениями сигналов. Дальнейшую демодуляцию данных следует проводить с использованием алгоритмов многоядерной обработки сигналов [4].

Выводы и перспективы дальнейших исследований в этом направлении. Таким образом, предлагаемый алгоритм коррекции включает следующие этапы:

- подача на вход приемника гармонических тестовых сигналов;
- аналого-цифровое преобразование сигналов в каждом из поляризаційных каналов;
- дополнительное стробирование отсчетов АЦП;
- определение коэффициентов амплитудной и фазовой поляризаційных неидентичностей и их сохранение в памяти спецвычислителя.

Процесс приема информационных сигналов отличается тем, что после процедуры дополнительного стробирования отсчетов АЦП проводится коррекция откликов стробов разбалансированного поляризаційного канала.

Данный метод позволяет упростить и удешевить аппаратуру формирования поляризаційных каналов, снизить уровень нелинейных гармоник в тракте и, как следствие, сформировать предпосылки для увеличения порядка поляризаційной или квадратурной амплитудной модуляций сигналов и скорости передачи информации.

Предложенный метод рекомендуется использовать в различных системах беспроводной связи, в том числе радиорелейной, тропосферной и телекодовой.

Дальнейшие исследования будут направлены на получение аналитических выражений оценок потенциальной точности коррекции, исследование граничных возможностей метода коррекции неидентичностей поляризаційных каналов приема, а также разработку предложений по его практической реализации в аппаратуре связи.

Литература

1. Справочник по цифровым радиорелейным системам / под ред. Рудольфа П. Хекен. — Женева : Бюро радиосвязи, 1996. — 390 с.
2. Слюсар В. И. Синтез алгоритмов измерения дальности Мисточников при дополнительном стробировании отсчетов АЦП // В. И. Слюсар // Радиоэлектроника. Изв. высш. учеб. заведений. — 1996. — № 5. — С. 55—62.
3. Слюсар В. И. Метод неортогональной дискретной частотной модуляции сигналов для узкополосных каналов связи // В. И. Слюсар, В. Г. Смоляр // Радиоэлектроника. Изв. высш. учеб. заведений. — 2004. —

№ 4. — С. 53—59. 4. Слюсар В. И. Многоядерная реализация алгоритмов обработки сигналов двойной поляризации / В. И. Слюсар, А. А. Зінченко, Д. В. Слюсар // Ра-

диоэлектроника и молодежь в XXI веке: 11-й Междунар. молодежный форум, 10—12 апреля 2007 г. : тезисы докл. — Х., 2007. — С. 134.

В статье приведен анализ факторов, приводящих к возникновению кроссполяризационной помехи при использовании сигналов двойной поляризации для повышения скорости передачи информации в радиоканалах. Предлагается метод коррекции неидентичностей поляризационных каналов приема сигналов двойной поляризации с дополнительным стробированием отсчетов аналого-цифрового преобразователя. Определены условия применения метода и ограничения, вводимые при этом. Приведены формулы оценки неидентичностей и конечные выражения для получения откорректированных значений напряжений.

Ключевые слова: радиосвязь, поляризация, амплитудная и фазовая неидентичности.

In article the analysis of the factors influencing originating crosspolarizations errors at use of signals of double polarization for increase of an information rate in radio channels is resulted. The method of correction polarization error signals of double polarization with an additional gating of samples of an analog to digital converter is offered. Mathematical calculations of reception of voltages of strobes and calculation crosspolarizations amplitude and phase errors are presented. The method and limiting conditions of usage entered thus are noted. Estimation formulas errors and final expressions for reception of the modified values of voltages are resulted.

Key words: radio communication, polarization, amplitude and phase errors.