

## **Организация поляриметрических режимов съемки в радиолокаторах с синтезированной апертурой космического базирования**

В.В. Костров, К.К. Храмов

*Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
602264 г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: [vyk\\_2004@rambler.ru](mailto:vyk_2004@rambler.ru), [hramovkk@gmail.com](mailto:hramovkk@gmail.com)*

*Рассматриваются вопросы реализации двойной и полной поляризации при зондировании Земли из космоса с использованием радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА). Рассмотрены одноканальные, двухканальные структуры приемо-передающих модулей (ППМ) активных фазированных решеток (АФАР). Особое внимание уделяется сигналам, применяемым для обеспечения полнополяризационного режима в двухканальном ППМ. В качестве квазиортогональных сигналов использованы сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и бинарной фазовой кодовой манипуляцией (ФКМ). Показано, что для реализации развязки каналов 25...30 дБ необходимо применение сигналов с базами более 4000. Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры антенны (РСА), поляризация, приемо-передающий модуль, ортогональные сигналы, поляриметрия*

## **Organization of polarimetric shooting modes in space-based synthetic aperture radars**

V.V. Kostrov, K.K. Khramov

*Murom Institute (branch) of the Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs*

*The issues of the implementation of double and full polarization when probing the Earth from space using a synthetic aperture radar (SAR) are considered. The single-channel, two-channel structures of the receiving and transmitting modules (T/R modules) of active phased antenna arrays (APAA) are considered. Special attention is paid to the signals used to ensure a fully polarizing mode in a two-channel T/R module. Signals with linear frequency modulation (LFM) and binary phase shift keying (BPSK) were used as quasi-orthogonal signals. It is shown that in order to implement the decoupling of channels of 25...30 dB, it is necessary to use signals with bases of more than 4000. Keywords: synthetic aperture radar (SAR), polarization, receiving and transmitting module, orthogonal signals, polarimetry*

### **Введение**

Поляризационные режимы съемки позволяют заметно повысить информативность радиолокационных изображений (РЛИ), формируемых с помощью радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны (РСА) [1–4]. Поляриметрия играет существенную роль в интерпретации РЛИ и классификации различных типов земных покровов, обнаружении нефтяных пленок, при оценке параметров леса и сельскохозяйственных культур, снежного или ледового слоя, построении карт рельефа местности высокого разрешения, для оценки смещений поверхности, в метеорологических приложениях [5, 6]. Практически все современные космические комплексы землеобзора (ALOS PALSAR, RadarSat, TerraSAR-X, Sentinel и др.) имеют поляриметрические режимы [1, 4].

Измерения на двух поляризациях дают новые возможности получения радиолокационных данных при проведении интерферометрических измерений. В системах дистанционного зондирования сформировалось новое направление –

поляризационная интерферометрия, позволяющее повысить точность измерения таких важных параметров, как смещение отдельных строений или других объектов мониторинга. Поляриметрия показала широкие возможности для определения фазового состояния облаков и осадков, классификации видов осадков и законов распределения капель по размерам [7], для ослабления мешающих отражений от неметеорологических целей [8], а также повысить защиту РСА в присутствии активных помех [9].

Перспективные РСА космического базирования строятся на базе активной фазированной антенной решетки (АФАР) [1, 4]. Применение АФАР в РСА придает им новые потребительские возможности по достижению высоких тактико-технических характеристик, позволяет повысить производительность съемки за счет использования эффективных высокоскоростных режимов обзора и повышении качества синтеза РЛИ [10]. При секционировании АФАР поляризационный прием позволяет улучшить пространственную разрешающую способность, снизить помехи неоднозначности, улучшить качество селекции движущихся целей [2].

Одним из основных элементов АФАР является приемо-передающий модуль (ППМ), который представляет собой сложное радиотехническое устройство и требует самостоятельного рассмотрения. Во многом именно ППМ определяет массогабаритные, энергетические и другие эксплуатационные характеристики АФАР.

Целью работы является анализ и разработка вариантов структур приемо-передающих модулей АФАР для реализации двойного и полного режимов поляризационного наблюдения в РСА землеобзора космического базирования.

*Общая характеристика режимов работы поляриметрического РСА.* Для организации поляриметрических режимов съемки в антенной системе предусматривается наличие двух излучателей, которые имеют вертикальную и горизонтальную поляризацию. Развязка между этими излучателями с учетом СВЧ тракта должна быть не менее минус 35 дБ [11], что обеспечивает погрешности данного фактора на 10...15 дБ ниже измеряемых величин. С точки зрения реализации поляризационного зондирования и измерения поляризационной матрицы важными являются следующие варианты построения ППМ: 1) одноканальный приемопередатчик; 2) одноканальный передатчик и двухканальный приемник; 3) двухканальный приемопередатчик. Классификацию поляризационных режимов целесообразно провести по двум показателям: поляризация сигналов при излучении и метод поляриметрии при приеме сигналов. В таблице 1 приведены базовые поляризационные режимы и их определение. Здесь приняты обозначения: В – вертикальная поляризация, Г – горизонтальная поляризация, К – круговая поляризация, Л – левовращательная поляризация; П – правовращательная поляризация; знак «+» означает одновременное излучение (прием).

**Таблица 1. Основные поляризационные режимы**

№ п/п	Поляризация при излучении	Поляризация при приеме	Наименование
1	В	Г или В	Линейная кросс-поляризация
2	Г	В или Г	
3	В	Г + В	Двойная линейная поляризация
4	Г	Г + В	
5	Г + В	Г + В	Полная поляризация (ортогональные сигналы)
6	Линейная, $\pm \pi/4$	В + Г	Компактная поляризация
7	К, КЛ или КП	В + Г	Компактная гибридная поляризация

В данный перечень не вошли простейшие виды согласованной поляризации на прием и передачу: Г/Г, В/В, К/К. Они не требуют дополнительных переключений излучателей и имеют ограниченные функциональные возможности. Например, наличие излучателя с круговой поляризацией автоматически ведет к приему на этой же поляризации.

Дальнейшее разнообразие методов поляризационных наблюдений достигается за счет использования временного и/или пространственного разнесения различных поляризаций.

*Одноканальный прямо-передатчик.* Пример структурной схемы ППМ приведен на рис. 1. Здесь приняты обозначения: ИГ, ИВ – излучатели с горизонтальной и вертикальной поляризацией; ФВ, Атт – управляемые фазовращатели и аттенюаторы; Атт0 – аттенюатор с фиксированным затуханием; Вх-Вых. – линия связи с общим прямо-передатчиком; ЗУ – защитное устройство; МШУ – малозумящий усилитель; УМ – усилитель мощности; Драйвер УМ – предварительный УМ; Ц – циркулятор; П – быстродействующие переключатели; Пп – переключатель поляризации. В цепи калибровки и контроля использован ответвитель и аттенюатор Атт0 с фиксированным затуханием.

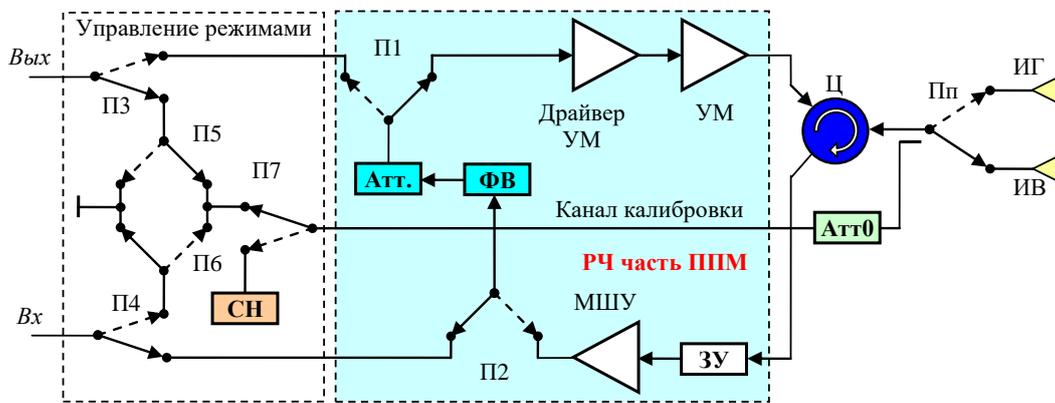


Рис. 1. Одноканальный ППМ с цепями контроля и калибровки

Схема отличается разветвленной системой переключателей: Пп, П1, П2 используются в штатном режиме при переключении поляризаций и режима передачи-приема; П3 – П7 обеспечивают внутренний контроль и калибровку радиочастотного тракта. В зависимости от положения переключателей в схеме можно последовательно проверить как приемную, так и передающую части ППМ.

Чтобы избежать потерь мощности в переключателях, а также упростить систему управления, для калибровки используют выделенную линию связи, а сигнальные вход-выход объединяют. При таком подходе отпадает необходимость использования двух сигнальных радиочастотных линий (Вх и Вых). Схема ППМ с отдельными линиями калибровки и сигнала приведена на рис. 2 [12]. Дальнейшая оптимизация структуры ППМ может идти в направлении рационального сочетания переключателей и управляемых элементов [13].

Использование одноканального ППМ предполагает временное разделение поляризации при передаче и приеме, поэтому в типовых режимах можно организовать режимы простой и перекрестной поляризации (Г/Г, Г/В, В/В, В/Г) в разные периоды зондирования (рис. 3). Перед каждым зондированием и приемом сигналов предусматривается временной интервал на переключение поляризации и режима «прием-передача» Ппд и Ппр.



Временные диаграммы режима двойной поляризации представлены на рис. 5 (верхняя часть соответствует каналу с горизонтальной поляризацией, нижняя – с вертикальной).

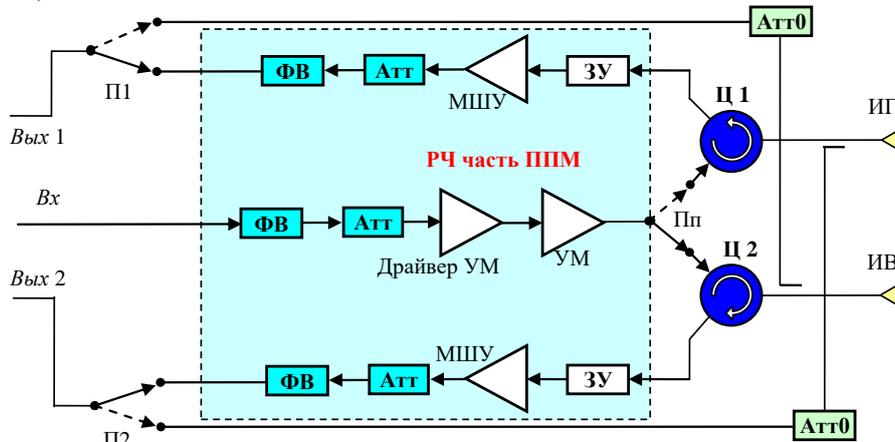


Рис. 4. ПИМ с общим передающим каналом

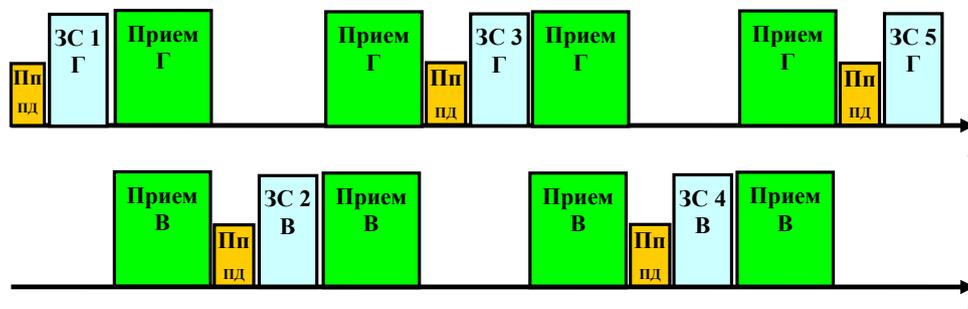


Рис. 5. Типовая временная диаграмма двойного поляризационного режима

В данном примере цикл начинается со случая, когда переключатель поляризации передатчика Пп подключает его к ИГ, поэтому зондирующий сигнал ЗС1 имеет горизонтальную поляризацию. Прием ведется одновременно на оба канала В и Г. Затем передатчик с помощью Пп переключается на излучатель с вертикальной поляризацией ИВ, а прием опять осуществляется в стробах обоих приемников. Таким образом, полный цикл поляризационного зондирования (Г/Г+В, В/Г+В) производится за два периода следования зондирующего сигнала. Можно отметить, что по сравнению с рис. 3 в диаграммах отсутствует переключение поляризации после окончания зондирующего сигнала, т.е. имеется небольшой резерв времени, который обычно не превышает 5...10 мкс. За счет этого резерва может быть увеличена зона съемки по горизонтальной дальности.

*Двухканальный приемо-передатчик.* Пример упрощенной структурной схемы двухканального ПИМ (FullPol) приведена на рис. 6. По сути это два ПИМ, которые имеют общие цепи контроля и калибровки. В цепях контроля использованы два ответвителя и два аттенуатора Атт0 с фиксированным затуханием, которые с помощью переключателей П5 и П6 подключаются в общую линию каналов передачи сигналов вертикальной и горизонтальной поляризации. В зависимости от положения переключателей предлагаемая структура позволяет последовательно проверить как приемные, так и передающие части ПИМ. Переключатели П1 – П4 служат для управления режимом передача-прием (на рис. 6 показан режим передачи).

Выбор требуемой поляризации осуществляется с помощью управляемого фазовращателя Пп, который рассчитан на дискретное переключение фазы. Суть его

работы определяется логикой получения необходимого вида поляризации и сводится к следующему. Пусть оба канала возбуждаются одним и тем же сигналом. Тогда этот сигнал будет определять сигнал с горизонтальной поляризацией  $U_G$ , поскольку изменения в ФВ и АтГ в каналах одинаковы и служат для управления лучом. Сигнал на выходе канала вертикальной поляризации в общем случае имеет сдвиг по фазе  $\psi_B$  по отношению к сигналу  $U_G$ , т.е.  $\dot{U}_B = \dot{U}_G \cdot \exp(i\psi_B)$ . Воспользуемся комплексным представлением зондирующего сигнала, который получается в пространстве. Тогда его векторное представление можно записать в виде

$$\dot{U}_{3C} = \dot{U}_G + \dot{U}_B \cdot \exp(i\vartheta),$$

где  $\vartheta$  – пространственное угловое положение вектора напряженности электрического поля вертикальной поляризации относительно сигнала при  $\psi_B = 0$ ;  $i$  – мнимая единица.

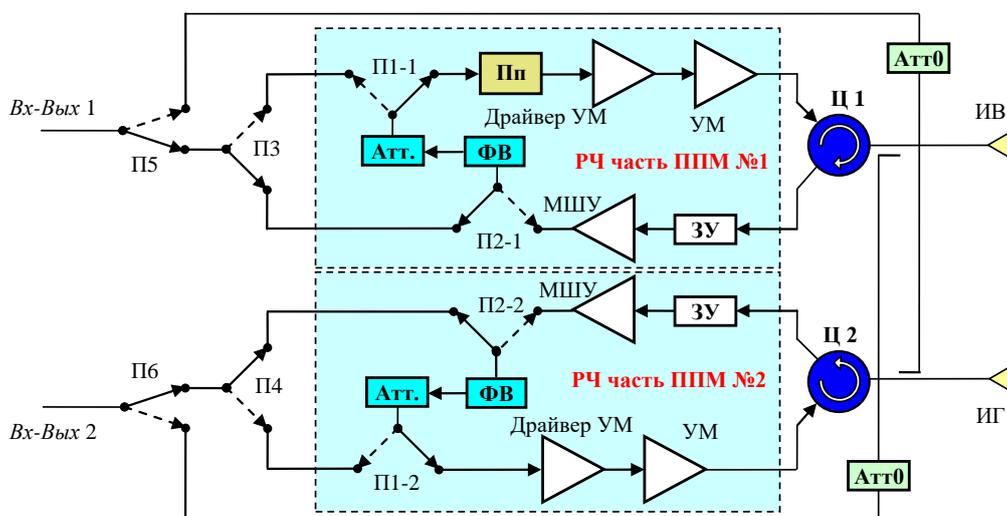


Рис. 6. Схема двухканального ПИМ с системой калибровки

Нетрудно заметить, что управление углом  $\vartheta$  можно производить внутри ПИМ, т.е. в Пп. Виды поляризации, которые можно получить при равных амплитудах излучаемых сигналов, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Возможные виды поляризации при одинаковом сигнале возбуждения

Значение угла $\vartheta$	Значение угла $\psi_B$	Вид модуляции
$0^\circ$	$0^\circ$	Линейная компактная поляризация с углом наклона $+\pi/4 (+45^\circ)$
$\pi (180^\circ)$	$0^\circ$	Линейная компактная поляризация с углом наклона $-\pi/4 (-45^\circ)$
$0^\circ$	$+\pi/2 (+90^\circ)$	Круговая правовращательная (П)* поляризация (гибридная)
$0^\circ$	$-\pi/2 (-90^\circ)$	Круговая левовращательная (Л)** поляризация (гибридная)
$\pi (180^\circ)$	$+\pi/2 (+90^\circ)$	Круговая левовращательная (Л) поляризация (гибридная)
$\pi (180^\circ)$	$-\pi/2 (-90^\circ)$	Круговая правовращательная (П) поляризация (гибридная)

Примечание: \*Если смотреть от излучателя в направлении распространения – вращение вектора  $E$  против часовой стрелки. \*\*Если смотреть от излучателя в направлении распространения – вращение вектора  $E$  по часовой стрелке.

Переключатель поляризации Пп имеет в своем составе последовательно соединенные управляемый инвертор (фазовращатель на  $0^\circ$  или  $180^\circ$ ) и квадратурный фазовращатель ( $-90^\circ, 0^\circ, +90^\circ$ ). Это позволяет из двух переключаемых фазовращателей получить 6 комбинаций и, соответственно, 6 поляризационных режимов, в которых прием сигналов всегда осуществляется на вертикальной и горизонтальной поляризациях (CompaPol).

*Полнополяризметрический режим (FullPol).* Интересным с точки зрения радиополяриметрии является использование двухканального варианта схемы ППМ при однолучевом сканировании с разными сигналами в каналах. Эта возможность появляется при использовании сложных сигналов, которые широко применяются в современных РЛС.

Пусть для зондирования используются два импульсных сигнала с базой  $B$ , причем канал с горизонтальной поляризацией возбуждается сигналом  $U_1(t)$ , а канал с вертикальной поляризацией – сигналом  $U_2(t)$ , которые являются ортогональными (квазиортогональными) [8, 9]:

$$R(\tau_p) = \int_0^{\tau_p} U_1(t)U_2(t)dt \approx 0,$$

где  $\tau_p$  – длительность импульса.

Эхо-сигнал цели будет характеризоваться набором сигналов с синхронными и деполаризационными составляющими  $S_1(t)$ ,  $S_{1dp}(t)$ ,  $S_2(t)$ ,  $S_{2dp}(t)$ , которые суммируются в пространстве и поступают на оба излучателя. Учитывая конечную развязку между каналами  $k_{cpd}$ , с точностью до коэффициента передачи линейной части для выходных сигналов приемников можно записать:

– для горизонтальной поляризации

$$S_{\Sigma 1}(t) = S_1(t) + S_{2dp}(t) + k_{cpd} [S_2(t) + S_{1dp}(t)];$$

– для вертикальной поляризации

$$S_{\Sigma 2}(t) = S_2(t) + S_{1dp}(t) + k_{cpd} [S_1(t) + S_{2dp}(t)].$$

Согласованная со своим сигналом обработка в каждом канале дает (в данном примере использовано обозначение  $\otimes$  свертки)

$$u_1 = U_1 \otimes S_{\Sigma 1} = U_1 \otimes S_1 + 0 + k_{cpd} [0 + U_1 \otimes S_{1dp}];$$

$$u_2 = U_2 \otimes S_{\Sigma 2} = U_2 \otimes S_2 + 0 + k_{cpd} [0 + U_2 \otimes S_{2dp}].$$

Дополнительную информацию можно получить, применив кросс согласованную обработку

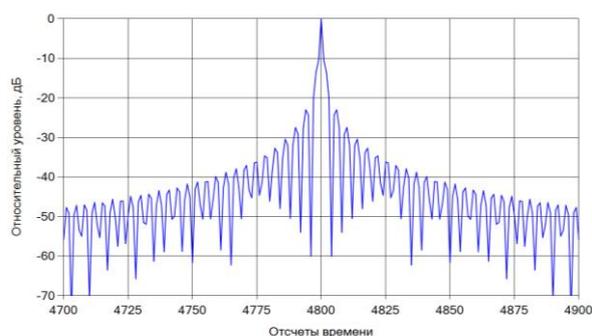
$$u_3 = U_2 \otimes S_{\Sigma 1} = 0 + U_2 \otimes S_{2dp} + k_{cpd} [U_2 \otimes S_2 + 0];$$

$$u_4 = U_1 \otimes S_{\Sigma 2} = 0 + U_1 \otimes S_{1dp} + k_{cpd} [U_1 \otimes S_1 + 0].$$

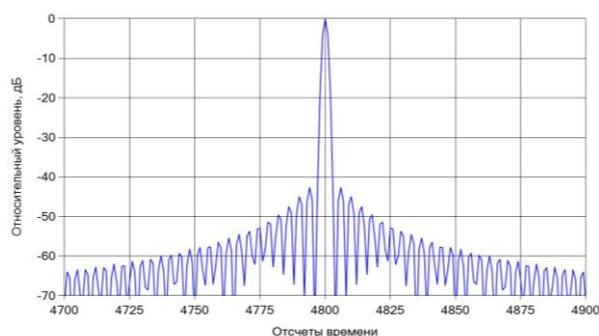
Как видим, ортогональность зондирующих сигналов позволяет подавить мешающие сигналы нежелательной поляризации ( $u_1, u_2$ ) и одновременно выделить соответствующие деполаризационные компоненты ( $u_3, u_4$ ). Для достоверности измерений достаточно выполнение условия  $S_{kdp} > 10 \cdot k_{cpd} \cdot S_k$ ,  $k = 1, 2$ . В соответствии с [11] уровень перекрестных помех в РСА должен составлять  $k_{cpd} \leq -35$  дБ, поэтому условие наблюдаемости деполаризованных сигналов ориентировочно можно определить соотношением  $S_{kdp}/S_k > 0,03$ . Реально достижимая развязка между каналами составляет  $k_{cpd} \approx -(25...30)$  дБ, отсюда для общего случая получаем более жесткое условие  $S_{kdp}/S_k > 0,1$ .

Рассмотрим возможность использования в качестве сигналов  $S_1(t)$  и  $S_2(t)$  сложных сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и фазокодоманипулированных сигналов (ФКМ). Ниже приводятся результаты моделирования сигналов и численных расчетов коэффициента подавления взаимных помех; расчеты проводились для квадратурной обработки сигналов.

Если применяется зондирующий ЛЧМ сигнал, то квазиортогональность обеспечивается переключением скорости изменения частоты с положительной на отрицательную. На рис. 7 представлен сигнал в области главного пика автокорреляционной функции ЛЧМ сигнала с параметрами: длительность импульса 20 мкс, девиация частоты 150 МГц, частота дискретизации 200 МГц, база сигнала  $B = 3000$ . Выбор таких параметров является типичным для РСА в маршрутном режиме и обеспечивает метровое разрешение по дальности. Рисунок, в частности, показывает, что ожидаемые первые боковые лепестки с уровнем  $-13$  дБ практически слились с основным лепестком из-за низкого отношения частоты дискретизации к девиации частоты (1,33). Весовая обработка позволяет заметно снизить уровень боковых лепестков (рис. 8, при расчетах использована оконная функция Хэмминга), однако, как известно, это сопровождается расширением основного лепестка и энергетическими потерями.

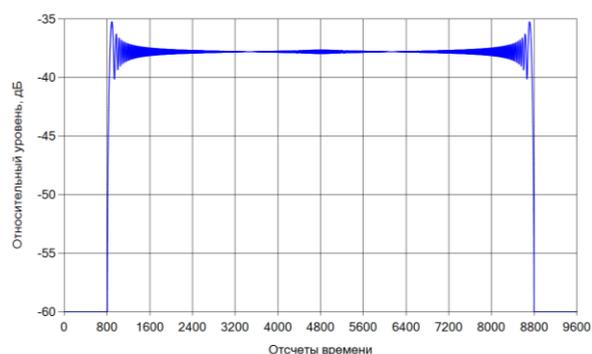


**Рис. 7. Отклик согласованного фильтра ЛЧМ сигнала**

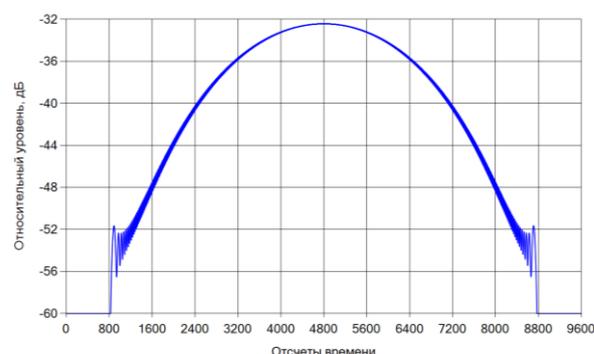


**Рис. 8. Отклик согласованного фильтра при весовой обработке ЛЧМ сигнала**

Кросс согласованная обработка дает на выходе фильтра взаимную корреляционную функцию (ВКФ) двух сигналов: один с положительной скоростью изменения частоты, второй – с отрицательной. На рис. 9 представлен отклик фильтра при прямоугольной огибающей сигналов, рис. 10 – при использовании весовой функции Хэмминга.



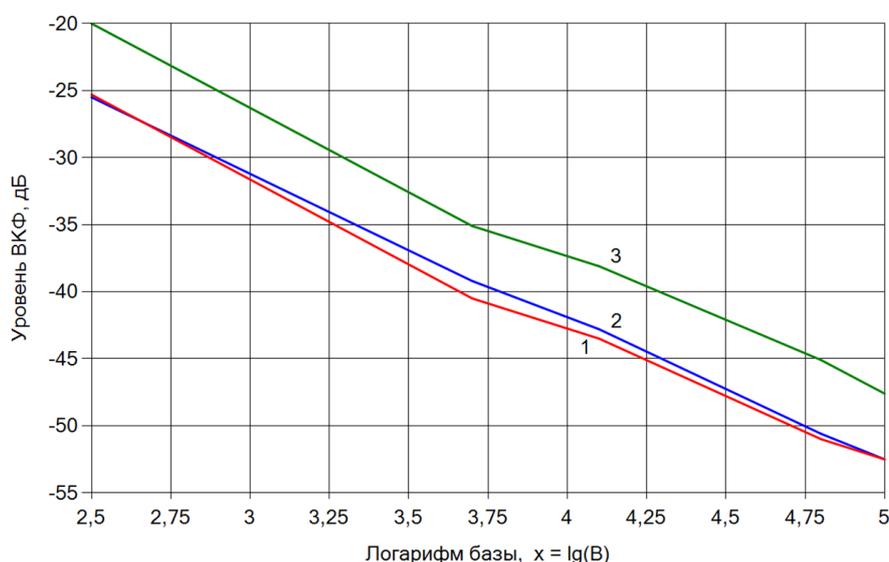
**Рис. 9. ВКФ сигналов с противоположными законами ЛЧМ**



**Рис. 10. ВКФ сигналов с противоположными законами ЛЧМ при весовой обработке**

Уровень сигнала отсчитывался относительно максимального уровня сжатого сигнала при согласованной обработке. График рис. 9 показывает, что сигнал на выходе фильтра в этом случае приблизительно дает импульс прямоугольной формы удвоенной длительности с выраженными пульсациями Френеля в начале и в конце импульса. Степень квазиортогональности в рассматриваемом примере можно оценить в минус 37,5 дБ (средний уровень вершины импульса). Весовая обработка (рис. 10) приводит к росту максимального уровня нежелательного сигнала примерно на 2,5...5 дБ, но в начале и в конце импульса наблюдается снижение уровня сигнала на 15...17 дБ.

Зависимость относительного уровня взаимной корреляции двух ЛЧМ сигналов с противоположным наклоном изменения частоты от величины базы сигнала ( $x = \lg(B)$ ) приведена на рис. 11 (линия 1). База сигнала изменялась в пределах от 300 до 100000. На этом же графике приведена аппроксимирующая линия (линия 2), которая определяется уравнением  $y = -10,79 \cdot \lg(B) + 1,25$  [дБ]. Для сравнения на рис. 11 приведена зависимость ВКФ сигналов при весовой обработке (линия 3).

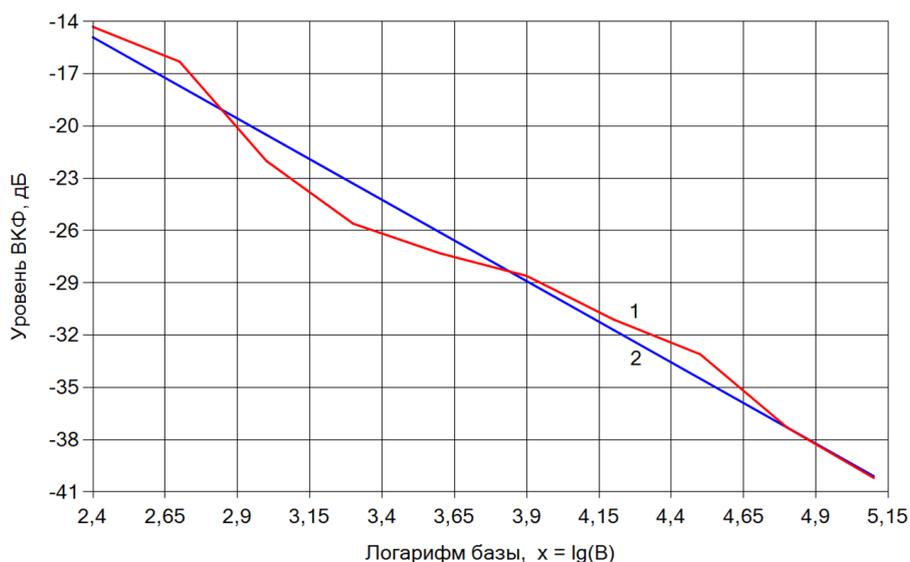


**Рис. 11. Зависимость уровня ВКФ от логарифма базы (ЛЧМ сигнал)**

При моделировании и расчетах с квазиортогональными ФКМ сигналами в качестве модулирующей использовалась М-последовательность. Для разделения сигналов применялись псевдослучайные последовательности с одинаковой базой В и различными порождающими полиномами.

Зависимость относительного уровня взаимной корреляции двух М-последовательностей от величины базы сигнала ( $x = \lg(B)$ ) представлена на рис. 12 (линия 1).

База сигнала изменялась в пределах от 255 до 131071 при значениях  $B = 2^K - 1$ , где  $K = 8...17$  – целые числа, которые дают минимальный уровень боковых лепестков. На этом же рисунке (линия 2) приведена аппроксимирующая линия, которая определяется уравнением  $y = -9,3 \cdot \lg(B) + 7,5$  [дБ]. Как показали расчеты, уровень ВКФ существенно зависит от выбранных полиномов и начальных условий в регистрах формирователя М-последовательности.



**Рис. 12. Зависимость уровня ВКФ от логарифма базы (ФКМ сигнал)**

*Краткие выводы.* Анализ возможности получения поляриметрической информации и технических решений по созданию ППМ АФАР позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Структура ППМ АФАР существенно зависит от тактических условий и задач, решаемых поляриметрическим радиолокационным комплексом на основе РСА. Наиболее широкие возможности поляризационных измерений обеспечивают двухканальные ППМ, которые позволяют реализовать полнополяризационный режим. Экономия массы и габаритов АФАР в случае РСА космического базирования достигается использованием ППМ с общим передатчиком и двумя приемными каналами для реализации двойной поляризации.

2. В РСА землеобзора космического базирования широко применяются различные разложения поляризационной матрицы рассеивания, соответствующие определенной модели поверхности и позволяющие существенно повысить качество классификации в различных тактических ситуациях.

3. Если в качестве порогового требования к степени подавления взаимных корреляционных помех предъявить уровень 25...30 дБ, то этим требованиям будет удовлетворять ансамбль М-последовательностей с базами более 4095...8191 (уровень ВКФ минус 27...30 дБ).

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-10114 (<https://rscf.ru/project/23-29-10114/>)*

### Литература

1. Верба В.С. и др. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. Авиационные системы радиовидения / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2015. – 648 с.
3. Воздушная разведка. Автоматизированное дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. И.К. Антонова. – М.: Радиотехника, 2021. – 368 с.
4. Груздов В.В., Колковский Ю.В., Криштопов А.В., Кудря А.И. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: Техносфера, 2020. – 482 с.
5. Вовшин Б.М. и др. Теория и практика поляризационных измерений в метеорологической радиолокации // II Всероссийские Армандовские чтения:

Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: Всерос. научн. конф. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2012. С.49-54.

6. *Ryzhkov A., et all.* Weather applications of dual-polarization radars // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 2. С.28-33.

7. *Костров В.В.* и др. Идентификация дождей по ослаблению и излучению микрорадиоволн в ортогональных плоскостях // Тезисы докл. 14 Всес. конф. по распространению радиоволн. Ч.2. – М.: Наука, 1984. С.24-25.

8. *Храбростин Б.В.* Система селекции целей радиолокатора с синтезированием апертуры и полным поляризационным зондированием // Научные ведомости БелГУ. 2011. №13(108). Вып.19/1. С.210-216.

9. *Поздышев В.Ю., Якубовский С.В., Зюзин А.В., Тимошенко А.В.* Обнаружение радиолокационных целей на фоне активных помех по определителю поляризационной матрицы рассеяния // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т.14. №9. С. 4-9.

10. *Костров В.В., Толстов Е.Ф.* Проблемы дистанционного зондирования Земли с использованием космических РСА высокого разрешения // VII Всероссийские Армандовские чтения / Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн (Муром–2017). – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2017. С.76-113.

11. Recommendations from CEOS CAL/VAL 2004. 3p. [https://earth.esa.int/workshops/ceos\\_sar\\_2004/recommendation\\_at\\_ceos\\_cal.html](https://earth.esa.int/workshops/ceos_sar_2004/recommendation_at_ceos_cal.html).

12. *Pilz D., Feldle P.* RF-Payload of TerraSAR-X // Proc. GeMiC 2005, Germany. Pp.140-143.

13. Патент 175 040 на ПМ Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> H01Q 21/00. Приёмо-передающий модуль активной фазированной решётки / *Ракитин А.В., Костров В.В.* Заявка №2017103380, заявл. 01.02.2017. Оpubл. 16.11.2017. Бюл. № 32. 12 с.