

УДК 621.396.967

Особенности реализации многолучевых режимов съемки с частотным разделением лучей в космических радиолокаторах синтезирования апертуры на базе активных фазированных антенных решеток

Булыгин М.Л

Научно-исследовательский институт точных приборов,

ул. Декабристов, 51, Москва, 127490, Россия

e-mail: Bulygin04@gmail.com

Аннотация

Одновременная регистрация аналоговым трактом АФАР космического РСА эхо-сигналов на разных несущих частотах при реализации многолучевых режимов съемки с частотным разделением приемных лучей приводит к искажению геометрии радиолокационного визирования. В статье проанализировано влияние данного эффекта на реализуемые характеристики многолучевого прожекторного и многолучевого сканирующего визирования, а также предложены алгоритмы компенсации данного эффекта за счет специального чередования номиналов несущих частот или оперативного управления положением многолучевой ДН в горизонтальной плоскости.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, активная фазированная антенная решетка, многолучевые режимы съемки.

Введение

Реализация в системах радиолокационного синтезирования апертуры (РСА) космического базирования режимов многолучевого визирования позволяет обходить фундаментальные ограничения, накладываемые эффектом неоднозначности на создание широкозахватных режимов съемки высокого разрешения [Ошибка! Источник ссылки не найден., 1, 6].

Одна из концепций реализации многолучевого визирования предусматривает пространственно-частотное кодирование формы сигнала на излучение с азимутальным цифровым формированием лучей диаграммы направленности (ДН) на прием [3, 4, 17]. Примером реализации являются многолучевой прожекторный и многолучевой сканирующий режимы съёмки, позволяющие существенно улучшить характеристики радиолокационного визирования по сравнению с однолучевыми режимами съемки [Ошибка! Источник ссылки не найден., 8, 9].

Применение многолучевых режимов съемки с азимутальной многолучевой ДН на прием возможно в РСА с сегментированными активными фазированными антенными решетками (АФАР), обеспечивающими многоканальную цифровую обработку сигналов в каждом из сегментов [10, 11, 19]. При этом антенные системы космических РСА реализуются на базе АФАР с аналоговыми фазовращателями приемо-передающих каналов [12, 13, 19].

В многолучевых режимах съемки с азимутальной цифровой ДН на прием при использовании частотного кодирования формы зондирующего импульса реализуется следующий алгоритм формирования многолучевого визирования. На

излучение формируется импульсная последовательность сигналов, представляющих собой пачку из нескольких суб-импульсов, где каждому суб-импульсу соответствует своя несущая частота f^k и свое азимутальное положение максимума ДН в горизонтальной плоскости α^k [4, 7]. При этом в аналоговой АФАР по вертикали, для излучения каждого суб-импульса в одинаковом вертикальном направлении θ_{t_y} , (соответствующему визированию полосы съемки под углом ε), реализуется линейное фазовое распределение, которое определяется приращением фаз между элементами решетки. Данное приращение между соседними элементами решетки, определяется следующим соотношением из теории антенн [14]:

$$\Delta\varphi_{t_y}^k = \frac{2\pi \cdot f^k \cdot h_y \cdot \sin(\theta_{t_y})}{c}, \quad (1)$$

где f^k – центральная частота излучаемого зондирующего суб-импульса, h_y – шаг антенной решетки по вертикали, c – скорость распространения радиоволн.

Следовательно, на излучение в многолучевом режиме съёмки положения фазовращателей АФАР должны меняться между излучениями каждого суб-импульса в соответствии с несущей частотой последующего излучаемого суб-импульса.

На прием эхо-сигналы со всех азимутальных направлений, облученные зондирующими суб-импульсами, достигают АФАР одновременно, что делает невозможным выполнение своевременной подстройки фазовращателей по вертикали для приема сигналов каждой частоты аналогично излучению.

Таким образом, формулируется задача исследования – провести анализ одновременного приема многочастотного сигнала в аналоговой АФАР при

реализации многолучевых режимов съемки с многолучевой азимутальной ДН на прием.

Искажение геометрии многолучевого визирования

На прием, приращение фаз между элементами решетки по вертикали определяется аналогично расчету на излучение:

$$\Delta\varphi_{r_y} = \frac{2\pi \cdot F_0 \cdot h_y \cdot \sin(\theta_{r_{0y}})}{c}, \quad (2)$$

где F_0 – центральная частота всего рабочего диапазона частот (в данном случае – частота на которую настроена АФАР по вертикали на прием), h_y – шаг антенной решетки по вертикали, $\theta_{r_{0y}}$ – угол отклонения луча ДН в вертикальной плоскости на прием.

В случае приема сигнала с частотой f^k при неизменном приращении фаз между каналами $\Delta\varphi_{r_y}$ и шаге антенной решетки по вертикали h_y , соотношение (2) преобразуется к следующему виду:

$$\Delta\varphi_{r_y} = \frac{2\pi \cdot f^k \cdot h_y \cdot \sin(\theta_{r_y^k})}{c}. \quad (3)$$

Из представленных соотношений, с учетом корректного нацеливания луча ДН при излучении суб-импульсов (в соответствии с соотношением 1) следует следующая зависимость углового положения максимума приемо-передающей ДН для сигналов с частотой f^k при их регистрации в АФАР, приемные каналы которой настроены на регистрацию сигнала частотой F_0 с направления θ_{0y} :

$$\theta_y^k = \frac{1}{2} \cdot \left(\arcsin \left(\frac{F_0}{f^k} \cdot \sin(\theta_{0y}) \right) + \theta_{0y} \right). \quad (4)$$

Полная ширина многолучевой ДН в вертикальной плоскости (за счет данного эффекта):

$$\Delta \varepsilon_{\text{полн}} = \frac{1}{2} \cdot \left| \arcsin \left(\frac{F_0}{\min(f)} \cdot \sin(\theta_{0y}) \right) - \arcsin \left(\frac{F_0}{\max(f)} \cdot \sin(\theta_{0y}) \right) \right| + \Delta \varepsilon, \quad (5)$$

где $\Delta \varepsilon$ – номинальная ширина одного луча приемо-передающей ДН по вертикали.

Таким образом, частотная дисперсия АФАР на прием ведет к отклонению результирующих приемо-передающих лучей ДН (каждый из которых реализует работу в своем азимутальном направлении на своей частоте f^k) от заданного угла визирования ε – как в антеннах с частотным сканированием [17]. На рисунке 1 представлена конфигурация приёмо-передающей многолучевой ДН в вертикальной плоскости при номинальном отклонении луча ДН на угол -15° , полученная по результатам моделирования.

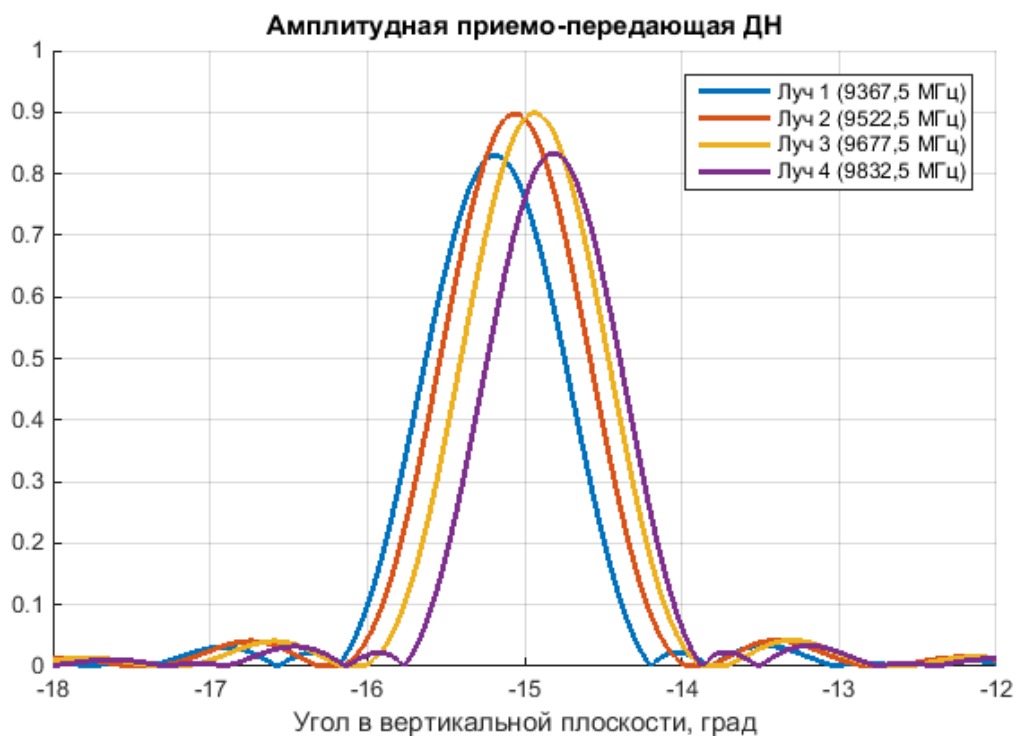


Рисунок 1 – Многолучевая приемно-передающая ДН в вертикальной плоскости при номинальном отклонении лучей на угол -15° в вертикальной плоскости

Результирующая приемно-передающая ДН каждого луча получает дополнительное отклонение по вертикали и дополнительные амплитудные потери, вызванные несоответствием частоты настройки АФАР частотам принимаемых эхосигналов. Рисунок 2 иллюстрирует зависимость ошибки нацеливания приемно-передающих лучей ДН, вызванных частотной дисперсией АФАР на прием, как отношение отклонения максимума приемно-передающей ДН в вертикальной плоскости по отношению к ширине ДН в вертикальной плоскости $(\theta_y^k - \theta_{y0})/\Delta\varepsilon$.

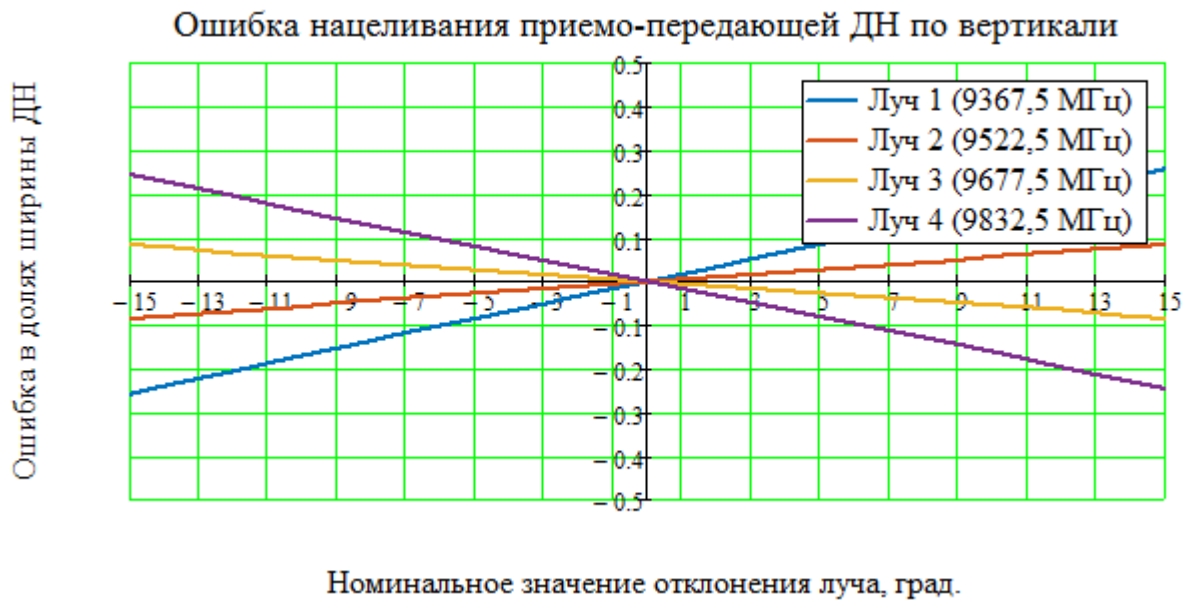


Рисунок 2 – Ошибка нацеливания $(\theta_y^k - \theta_{y0})/\Delta\epsilon$ приёмно-передающей ДН по вертикали, вызванного приемом в АФАР сигнала с частотой, отличной от частоты настройки фазовращателей АФАР $F_0 = 9600$ МГц

Ошибка нацеливания лучей в многолучевых режимах съемки приводит к существенному искажению геометрии визирования при реализации многолучевой радиолокационной съемки. Проиллюстрируем влияние данного эффекта с использованием имитационной модели РСА, реализующей комплексное суммирование монохроматического эхо-сигнала по апертуре АФАР РСА порожденным отражением каждой точкой на поверхности Земли (в пределах границ моделирования данной поверхности) зондирующего суб-импульса [15].

На рисунке 3 представлено геометрическое расположение кадров на поверхности Земли (в координатах путевая-горизонтальная дальность) при реализации многолучевого прожекторного режима съемки для системы РСА с параметрами, представленными в таблице 1 [Ошибка! Источник ссылки не

найден.]. Кадры расположены на ближнем краю полосы обзора (отклонение луча ДН по вертикали -15°).

Таблица 1 – Характеристики расчетной системы РСА

Параметры	Значение	
Центральная частота, F_0	X-диапазон 9600 МГц	
Максимальное число формируемых каналов обработки на прием, K	4	
Номиналы несущих частот суб-импульсов, f^k	9367,5 МГц, 9522,5 МГц, 9677,5 МГц, 9832,5 МГц	
Угол крена антенны, $\varepsilon_{кр}$	35°	
Высота орбиты, H	650 км	
Плоскость антенны	Горизонтальная	Вертикальная
Размер апертуры АФАР, $D_x \times D_y$	4,032 м	1,6 м
Количество элементов решетки $N_x \times N_y$	9	64
Шаг между элементами решетки $h_x \times h_y$	0,448 м	0,025 м
Сектор сканирования лучом ДН, $\Delta\alpha_{скан} \times \Delta\varepsilon_{скан}$	$\pm 1,0^\circ$	$\pm 15^\circ$
Ширина двусторонней ДН, $\Delta\alpha \times \Delta\varepsilon$	$0,30^\circ$	$0,77^\circ$

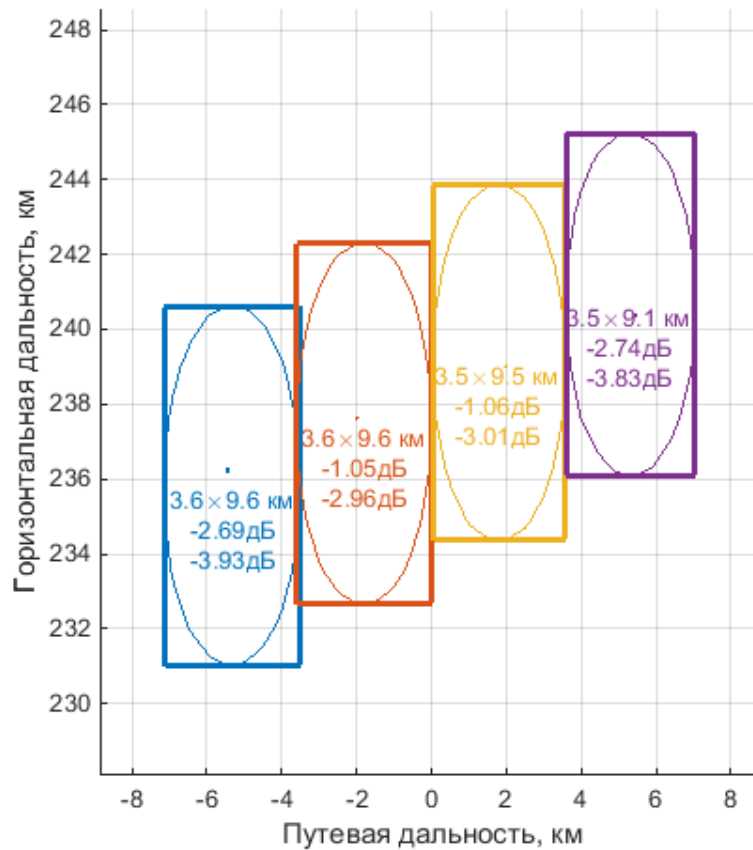


Рисунок 3 – Расположение кадров на поверхности Земли, образованные $K = 4$ антенными лучами в режиме многолучевой прожекторной съемки (Синий – луч 1 (9367,5 МГц); оранжевый – луч 2 (9522,5 МГц); желтый – луч 3 (9677,5 МГц); фиолетовый – луч 4 (9832,5 МГц)).

Эффективная ширина многолучевой ДН в вертикальной плоскости, в пределах которой формируется прямоугольный участок местности:

$$\Delta \varepsilon_{эфф} = \Delta \varepsilon_{ном} - \frac{1}{2} \cdot \left| \arcsin \left(\frac{F_0}{\min(f)} \cdot \sin(\theta_{0y}) \right) - \arcsin \left(\frac{F_0}{\max(f)} \cdot \sin(\theta_{0y}) \right) \right|, \quad (6)$$

В случае, представленном на рисунке 3 поперечная протяженность полосы съемки сократится с $L_{c_z} = 9,6$ км до $L_{c_z} = 4,5$ км (диапазон горизонтальных

дальностей 236,0 км ... 240,5 км). В этом случае эффективная полоса съемки определяется следующим соотношением:

$$L_{c_{\text{эфф}z}}(\varepsilon) = L\left(\varepsilon + \frac{\Delta\varepsilon_{\text{эфф}}}{2}\right) - L\left(\varepsilon - \frac{\Delta\varepsilon_{\text{эфф}}}{2}\right), \quad (7)$$

где L – горизонтальная дальность в соответствии с выражением [15]:

$$L(\varepsilon) = (R_S + \Delta h_{\text{ПС}}) \cdot (\arcsin(K_S \cdot \sin(\varepsilon)) - \varepsilon), \quad (8)$$

где R_S – радиус Земли, $\Delta h_{\text{ПС}}$ – высота рельефа визируемого участка местности,

K_S – коэффициент сферичности с учетом рельефа и изменений высоты КА:

$$K_S = \frac{R_S + H + \Delta H}{R_S + \Delta h_{\text{ПС}}}, \quad (9)$$

ε – угол визирования, $\Delta\varepsilon_{\text{эфф}}$ – эффективная ширина ДН в соответствии с выражением 6 вычисляемое для угла отклонения θ_{0y} , реализующего нацеливание ДН на угол визирования ε :

$$\theta_{0y} = \varepsilon - \varepsilon_{\text{кр}}, \quad (10)$$

где $\varepsilon_{\text{кр}}$ – угол крена, под которым ориентирована апертура АФАР РСА.

Для компенсации указанного сокращения полосы съемки возможно снизить уровень, по которому отсчитывается ширина ДН антенны по вертикали – то есть допустить дополнительные энергетические потери на краю полосы съемки в пользу расширения ширин луча ДН. Данная мера применима при реализации конкретного режима съемки с одновременным контролем энергетических и геометрических характеристик.

Амплитудные потери, вызванные данным частотной дисперсией АФАР на прием, могут быть оценены по форме приемо-передающей ДН АФАР по вертикали:

$$A_{loss}^k \approx Ft_y(\theta_y^k - \theta_{0y}) \cdot Fr_y(\theta_{ry}^k - \theta_{0y}), \quad (11)$$

где $Ft_y(\theta)$ и $Fr_y(\theta)$ – ДН АФАР, соответственно, на излучение и прием в вертикальной плоскости (без отклонения), θ_y^k – угловое положение максимума приемо-передающей ДН, определяемое по соотношению (4), θ_{0y} – номинальное значение отклонения ДН по вертикали.

Таким образом, частотная дисперсия АФАР на прием, при использовании многолучевых режимов съемки, приводит к сокращению визируемого участка местности по горизонтальной дальности в многолучевом прожекторном режиме съемки и дополнительным энергетическим потерям.

Эффект частотной дисперсии в режиме многолучевой сканирующей съемки

Многолучевая сканирующая съемка основана на комбинации технологии многолучевого визирования и классического сканирующего режима ScanSAR, алгоритмы реализации которой подробно рассмотрен в работе [4]. Согласно данным алгоритмам при визировании $K = 4$ антенными лучами $M = 3$ парциальных полос в $N_{\psi} = 2$ циклах визирования реализуется геометрия визирования, представленная в левой части рисунка 4, полученная по результатам моделирования. Центр полосы съемки визируется под углом $\varepsilon = 35^\circ$ – что соответствует отклонению луча ДН в вертикальной плоскости ($\theta_{0y} = 0$). В правой части данного рисунка представлена геометрия при аналогичных параметрах съемки, реализуемая на ближнем краю полосы обзора при визировании центра полосы съемки под углом $\varepsilon_{\psi} = 23^\circ$ – что соответствует углу отклонения приемо-передающей ДН $\theta_{0y} = -12^\circ$.

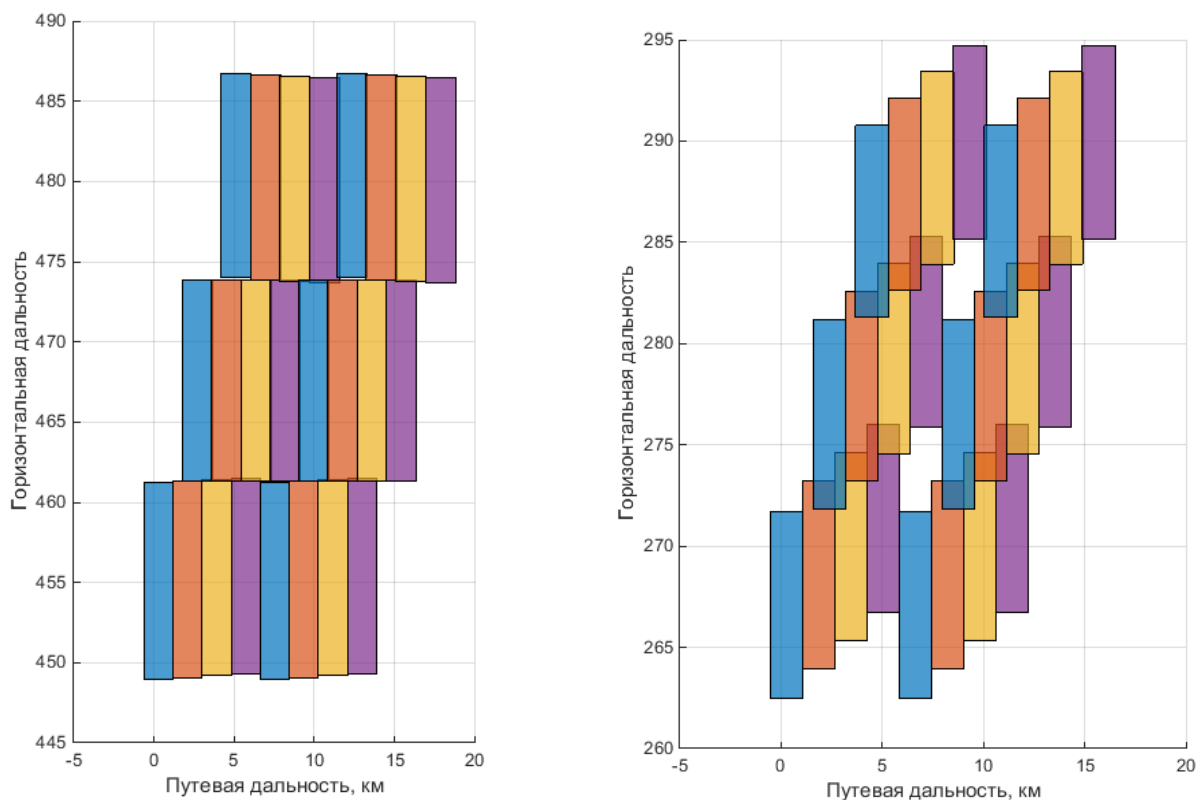


Рисунок 4 – Моделирование расположения парциальных кадров при многолучевой сканирующей съемке. Слева – в середине полосы обзора (визирование без отклонения многолучевой ДН по вертикали, $\varepsilon_{\eta} = 35^{\circ}$), справа – на ближнем краю полосы обзора (при отклонении многолучевой ДН по вертикали на угол $\theta_{0y} = 12^{\circ}$, $\varepsilon_{\eta} = 23^{\circ}$) при $M = 3$, $K = 4$.

Частотная дисперсия АФАР на прием оказывает существенное влияние на геометрию радиолокационного визирования, и приводит к появлению пропусков при многолучевой сканирующей съемки. Компенсация данных пропусков возможно двумя способами.

Первый способ предполагает ведение специального чередования номиналов несущих частот f^k всех K лучей при переходе на новую парциальную полосу,

реализующегося следующим образом. k -ый луч (где $k = 1 \dots K$) при визировании m -ой парциальной полосы (где $m = 1 \dots M$) для компенсации частотного эффекта частотной дисперсии на прием будет иметь номинал несущей частоты $f_{ком}^k = f^{n(k)}$, где $f^k = f^1, f^2, \dots, f^K$ – массив номиналов частот данного многолучевого режима, $n(k)$ – порядковый номер номинала несущей частоты в массиве f^k , определяемый соотношением:

$$n(k) = (k - 1 + m) \bmod K, \quad (12)$$

где k – номер антенного луча, для которого определяется номинал несущей частоты, m – порядковый номер парциальной полосы съемки в которой осуществляется визирование, $a \bmod b$ – операция взятия остатка от деления a на b , K – количество антенных лучей многолучевого визирования.

Положение лучей ДН во всех парциальных полосах определяется соотношением:

$$\alpha^k = \Delta\alpha \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{2 \cdot k - (K + 1)}{M + K}. \quad (13)$$

Полный азимутальный сектор, в котором осуществляется многолучевое визирование:

$$\Delta\alpha_{виз} = \Delta\alpha \cdot \left(\frac{2 \cdot M \cdot K}{M + K} - \frac{M}{M + K} \cdot (K + 1) \right). \quad (14)$$

На рисунке 2 представлена геометрия визирования при применении алгоритма частотного чередования.

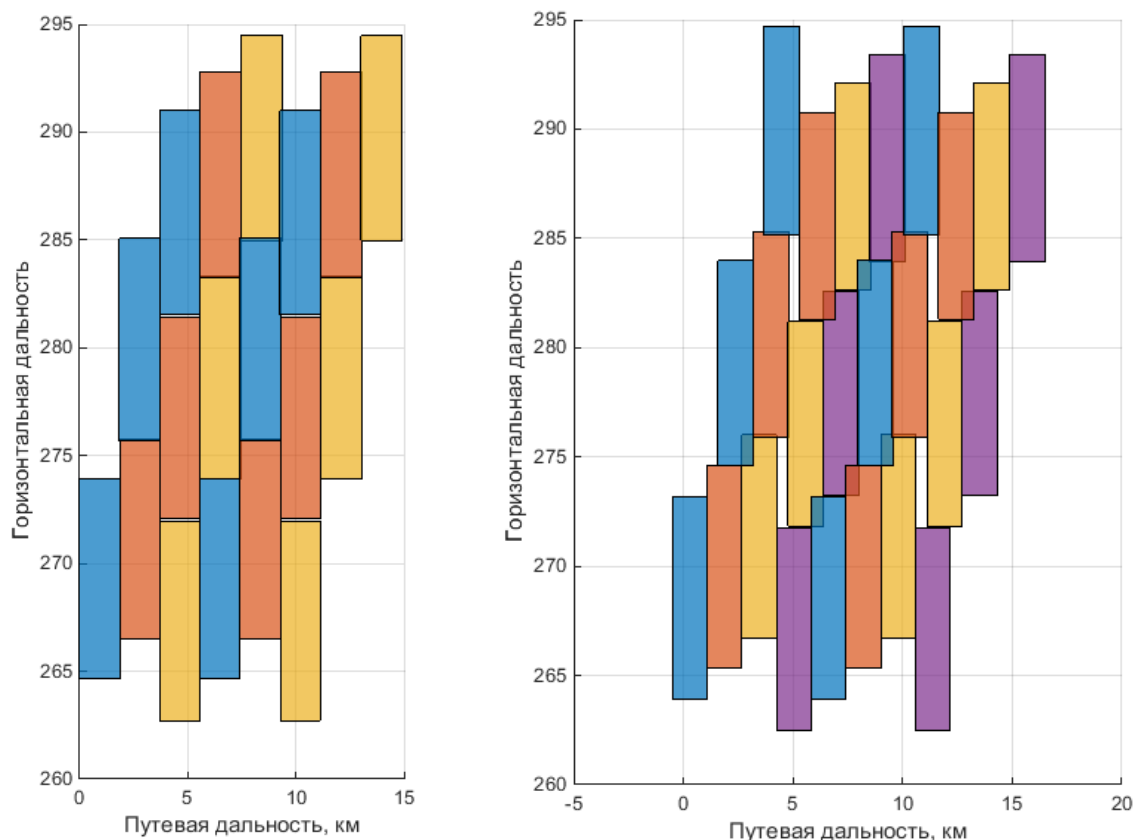


Рисунок 5 – Моделирование геометрии визирования $M = 3$ парциальных полос в многолучевом сканирующем режиме съемки с применением частотного чередования. Слева – визирование в $K = 3$ антенными лучами, справа – $K = 3$ антенными лучами.

Данный способ применим для визирования без пропусков только при соблюдении равенства $M = K$ – что существенно ограничивает свободу применения многолучевой сканирующей съемки для повышения характеристик визирования в РСА. Однако не требует введения дополнительных отклонений лучей ДН по горизонтали.

Второй способ компенсации пропусков предполагает оперативное управление положением многолучевой ДН в горизонтальной плоскости при перенацеливании на

новую парциальную полосу и их неизменном угловом положении в процессе синтеза апертуры. Для этого при визировании антенные лучи ориентируются в горизонтальных направлениях, определяемых следующим соотношением:

$$\alpha^k(m) = \Delta\alpha \cdot \left(\frac{M}{2} \cdot \frac{2 \cdot k - (K + 1)}{M + K} - \frac{K}{M + K} \cdot \left(m - \frac{M - 1}{2} \right) \right), \quad (15)$$

где $\Delta\alpha$ – ширина одного луча ДН в горизонтальной плоскости, k – номер антенного луча, для которого определяется угловое положение, M – количество парциальных полос визирования, K – количество антенных лучей многолучевого режима, m – номер парциальной полосы в которой осуществляется визирование.

Полный азимутальный сектора $\Delta\alpha_{виз}$, в котором осуществляется перенацеливание антенных лучей:

$$\Delta\alpha_{виз} = \Delta\alpha \cdot \left(\frac{2 \cdot M \cdot K}{M + K} - 1 \right), \quad (16)$$

В результате компенсации пропусков при съемке на ближнем краю полосы обзора за счет азимутального нацеливания антенных лучей реализуется геометрия визирования, представленная на рисунке 6.

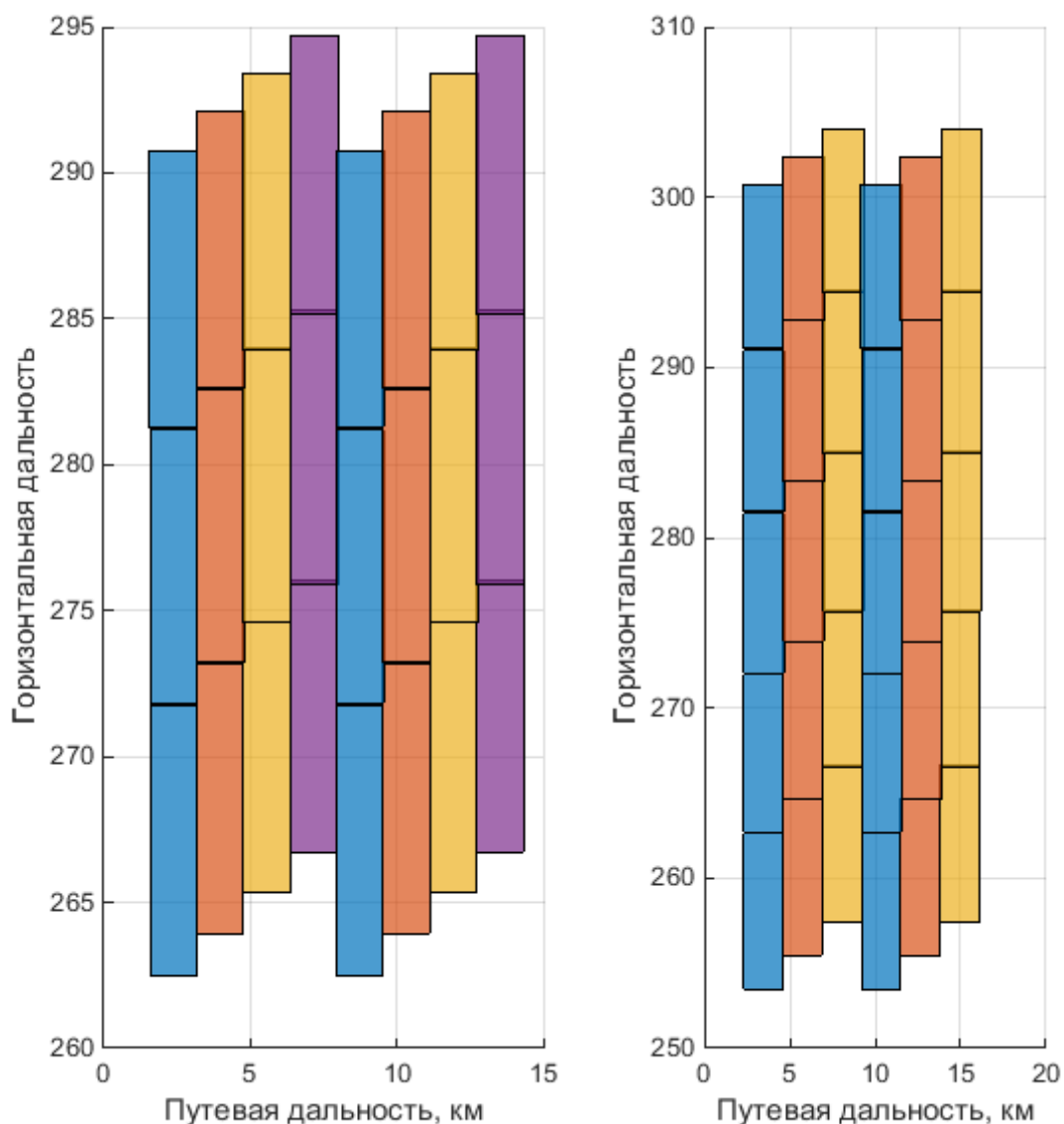


Рисунок 6 – Геометрии визирования в многолучевом сканирующем режиме съемки с применением дополнительного отклонения антенных лучей по горизонтали. Слева – визирование в $K = 4$ антенными лучами в $M = 3$ парциальных полосах, справа – $K = 3$ антенными лучами в $M = 5$ парциальных полосах.

Увеличение числа визируемых полос M снижает влияние частотной дисперсии антенной системы при многолучевом визировании на поперечную

протяжённость реализуемого кадра, поскольку данный эффект сказывается только на первой и последней парциальных полосах визирования.

Таким образом, предложенные подходы позволяют снизить влияние эффекта частотной дисперсии АФАР на прием на реализуемые характеристики многолучевого визирования. Причем алгоритм частотного чередования задействует значительно меньший азимутальный сектор $\Delta\alpha_{виз}$, чем алгоритм оперативного управления положением многолучевой ДН по азимуту (рисунок 7), что может быть существенным, для систем РСА с ограниченными возможностями по отклонению луча ДН в горизонтальной плоскости.

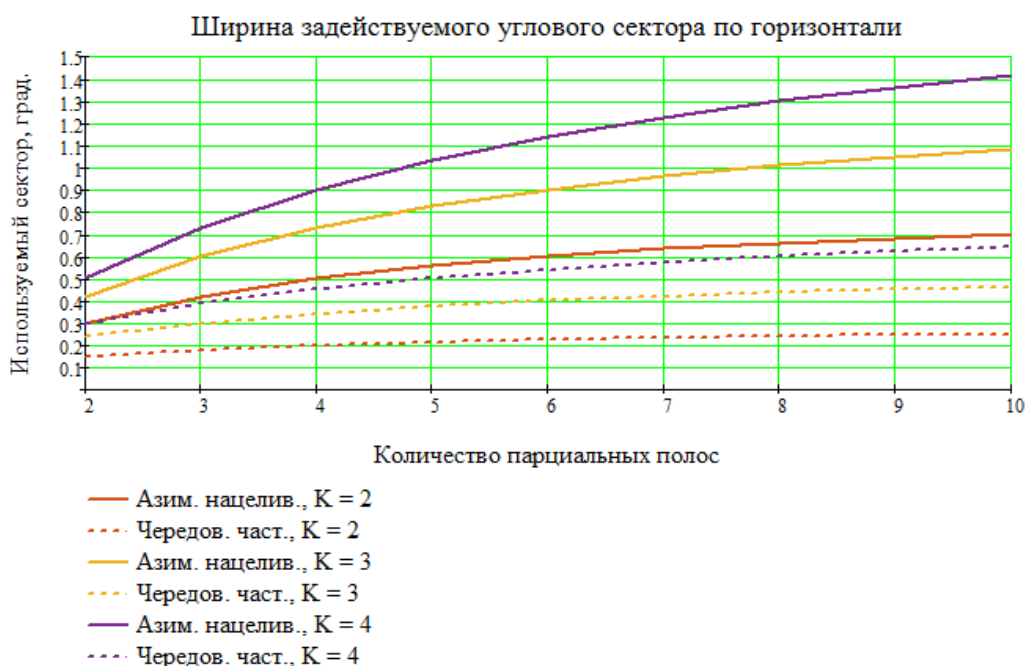


Рисунок 7 – Угловая ширина сектора в горизонтальной плоскости в котором осуществляется визирование в многолучевом сканирующем режиме при различных способах компенсации пропусков при радиолокационной съемке, вызванных частотной дисперсией аналоговой АФАР на прием, в зависимости от количества парциальных полос визирования M .

Заключение

Применение многолучевых режимов съемки с частотным разделением приемных ДН в РСА с аналоговой АФАР сопряжено с проявлением сверхширокополосных эффектов, проявляющихся в дополнительных отклонениях лучей ДН в вертикальной плоскости. Данный эффект приводит к искажению геометрии визирования в многолучевых режимах съемки, выливающиеся в сокращение реализуемой протяженности визируемого участка местности по горизонтальной дальности в многолучевом прожекторном режиме съемки и появлению пропусков при съемке в многолучевом сканирующей съемке, а также к дополнительным энергетическим потерям.

Рассмотренные алгоритмы оценки искажений и методики компенсации данного эффекта позволяют частично нивелировать влияние данного эффекта на качество радиолокационной съемки. В режиме многолучевой сканирующей съемки применение алгоритма частотного чередования позволяет вести радиолокационную съемку без пропусков при соответствии числа формируемых антенных лучей количеству парциальных полос визирования без дополнительного расширения азимутального сектора визирования. Алгоритм оперативного управления положением многолучевой ДН по азимуту позволяет реализовать многолучевую сканирующую съемку без пропусков при произвольном количестве используемых антенных лучей и парциальных полос визирования за счет расширения азимутального сектора в котором осуществляется визирование.

Библиографический список

1. Krieger G., Gebert N. and Moreira A. Digital beamforming techniques for spaceborne radar remote sensing in Proc. EUSAR, Dresden, Germany, 2006, URL: http://elib.dlr.de/43801/1/KrGeMo_EUSAR06_13Mar06.pdf
2. Gerhard Krieger, Nicolas Gebert, Alberto Moreira: Multidimensional Waveform Encoding: A New Digital Beamforming Technique for Synthetic Aperture Radar Remote Sensing // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, January 2008, vol. 46, no. 1, pp. 31 – 46.
3. Marwan Younis, Felipe Queiroz de Almeida, Federica Bordonni, Paco López-Dekker, Gerhard Krieger. Digital beamforming techniques for multi-channel synthetic aperture radar // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 2016. URL: <http://elib.dlr.de/104069>
4. Булыгин М.Л., Внотченко С.Л., Коваленко А.И., Риман В.В., Чечина И.Н. Режим многоканальной съемки в многоапертурном космическом радиолокаторе с синтезированной апертурой // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 5. С. 20 - 26.
5. Bulygin M., Kovalenko A., Riman V., Vnotchenko S. Multi-channel modes implementation in spaceborne SAR with digital active electronically scanned array, EUSAR 2016 // 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Electronic Proceedings, Hamburg, Germany, 6-9 June 2016, pp. 315 – 318.
6. Pingping Huang, Wei Xu. A New Spaceborne Burst Synthetic Aperture Radar Imaging Mode for Wide Swath Coverage // Remote Sensing, 2014, vol. 6, no.1, pp. 801 - 814.

7. Булыгин М.Л., Маркова А.С., Муллов К.Д. Реализация режима многоканальной сканирующей съемки в радиолокаторе космического базирования, // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90438>
8. Внотченко С.Л., Коваленко А.И., Римап В.В., Шишанов А.В. Технический облик многоапертурного космического радиолокатора с синтезированной апертурой на основе АФАР X-диапазона // Всероссийские радиофизические научные чтения-конференции памяти Н.А. Арманда. Сборник докладов. (Муром, 28 июня – 1 июля 2010). – Муром: Полиграфический центр МИ ВлГУ, 2010, С. 91 - 95.
9. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M., Krieger G., Hajnsek I., Papathanassiou K.P. A tutorial on synthetic aperture radar // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013, vol. 1, no. 1. pp. 6 - 43.
10. Kovalenko A., Riman V., Shishanov A., Vnotchenko S. Design of Prospective Spaceborne Multi-Aperture UWB Polarimetric High Performance SAR System // 4th Microwave and Radar Week MRW-2010, 11th International Radar Symposium, Vilnius, Lithuania, June 16-18, 2010, pp. 490 - 492.
11. Kovalenko A., Riman V., Shishanov A., Vnotchenko S. Architecture and Performance of the Spaceborne Multi-Aperture High-Resolution SAR System Based On Analog-Digital Active Array Antenna, EUSAR 2012 // 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Electronic Proceedings, 23-26 April 2012, Nurnberg, Germany, pp. 429 - 432.
12. Нониашвили М.И., Крючков И.В., Лесников Г.А. и др. Обзор современных радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования и анализ тенденций их развития // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 8. С. 10.

13. Potin P., Rosich B., Grimont P., Miranda N., Shurmer I., O'Connel A., Torres T., Krassenburg M. Sentinel-1 Mission Status. Proceedings of EUSAR 2016 // 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar, June 6 - 9, 2016, Hamburg, Germany, pp. 59 - 64.
14. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.
15. Булыгин М.Л., Внотченко С.Л. Построение диаграмм слепых дальностей и надирных отражений радиолокатора с синтезированной апертурой в MATLAB // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62290>
16. Брызгалов А.П., Ковальчук И.В., Хныкин А.В., Шевела И.А., Юсупов Р.Г. Моделирование радиолокатора с синтезированной апертурой при решении задач его внутреннего и внешнего проектирования // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24734>
17. Сучков А.В. Имитационное моделирование эффекта нормали в антенных решетках с частотным сканированием // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76809>
18. Gebert N., Krieger G., Moreira. A. Digital Beamforming on Receive: Techniques and Optimization Strategies for High-Resolution Wide-Swath SAR Imaging // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 564 - 592.
19. Krieger G., Younis M., Gebert N., Huber S., Bordoni F., Patyuchenko A., Moreira A. Advanced digital beamforming concepts for future SAR systems. Proceedings of 2010 // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). 26 - 30 July

2010, Honolulu, Hawaii, available at:

http://elib.dlr.de/64961/1/igrass2010_dbf_09Dec09.pdf

20. Capece P. Active SAR Antennas: Design, Development, and Current Programs. Review Article // International Journal of Antennas and Propagation, Article ID 796064, Hindawi Publishing Corporation, 2009, vol. 2009, 11 p., available at:

<http://doi:10.1155/2009/796064>