

# Актуальность и полнота радиолокационных данных как прагматические характеристики космических систем дистанционного зондирования Земли

А.Н. Жегалов

*Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского,  
197082 Санкт-Петербург, Ждановская наб., 13  
E-mail: [zhegalovan@mail.ru](mailto:zhegalovan@mail.ru)*

Предлагается системная характеристика космической системы дистанционного зондирования Земли, учитывающая принципы функционирования элементов системы, требования различного рода потребителей, ресурсные ограничения. Принцип обоснования характеристики основан на определении степени важности получаемых данных дистанционного зондирования Земли для потребителя. Показаны основные отличия предлагаемой характеристики по сравнению с общепринятыми показателями. Рассмотрены условия функционирования элементов системы, и приведены описывающие их зависимости.

**Ключевые слова:** космическая система дистанционного зондирования Земли, космический радиолокатор с синтезированной апертурой, прагматическая характеристика, системная оценка.

## Введение

Космические системы дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ) представляют сложные системы с большим числом разнородных, пространственно разнесенных элементов. Классификация КС ДЗЗ основана на типе обзора средств наблюдения. В настоящее время активно используются средства наблюдения в оптическом, инфракрасном и радиодиапазонах. Целевая задача функционирования КС ДЗЗ заключается в обеспечении различного рода потребителей данными ДДЗ (ДДЗЗ) по необходимому участку земной поверхности (УЗП), качеством не хуже требуемого и в заданный срок. Наиболее часто используемые характеристики КС ДЗЗ не позволяют объективно судить о качестве функционирования КС ДЗЗ по целевому назначению, так как определяются свойствами не всей системы, а лишь свойствами некоторых элементов. Например, периодичность обзора заданного участка зависит в основном от баллистического построения группировки космических аппаратов (КА), пространственное разрешение получаемых ДДЗЗ также определяется только техническими возможностями аппаратуры, установленной на КА, а не показателями всех элементов системы. Для описания системы необходима системная оценка, адекватно учитывающая характеристики и особенности функционирования всех элементов в процессе выполнения целевой задачи КС ДЗЗ. В роли данного показателя предлагается использовать вектор прагматических характеристик КС ДЗЗ.

Прагматическая характеристика КС ДЗЗ – характеристика, показывающая степень соответствия (важность) предоставляемых системой ДДЗЗ требованиям потребителей.

Из перечисленных типов средств наблюдения, применение космических радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (КРСА) в ряде случаев дает неоспоримые преимущества перед другими средствами. Основное из них – наибольшая оперативность наблюдения в силу независимости от условий освещенности УЗП и погодных условий. Использование различных частот зондирующего сигнала, поляризационных режимов, когерентной обработки позволяет эффективно выполнять требования широкого круга потребителей, то есть КС ДЗЗ на основе КРСА изначально обладают большими потенциальными возможностями. Дальнейшее рассмотрение прагматической характеристики производится для КС ДЗЗ на основе КРСА.

## Сущность прагматической характеристики КС ДЗЗ

Прагматическая характеристика КС ДЗЗ на основе КРСА ( $I_{ПХ}$ ), определяемая важностью радиолокационных данных (РЛД) для потребителя, является комплексным показателем. Ценность РЛД для потребителя составляет актуальность РЛД ( $A_{КРСА}$ ) и полнота РЛД ( $V_{КРСА}$ ), предоставляемых КС ДЗЗ.

$$I_{ПХ} = \{A_{КРСА}, V_{КРСА}\} \quad (1)$$

Заявка потребителя, в общем случае, включает следующие требования:

$$Z = \{(B_1; B_2), (L_1; L_2), \mathcal{D}, \mathcal{B}, \mathcal{L}, \Delta T, Pol\} \quad (2)$$

где  $(B_1; B_2), (L_1; L_2)$  - пространственное расположение и размеры УЗП (широта и долгота границ УЗП);  $\mathcal{D}$  - радиометрическое разрешение РЛИ;  $\mathcal{B}, \mathcal{L}$  - пространственное разрешение РЛИ;  $\Delta T$  - временной интервал от момента подачи заявки до момента получения ДДЗЗ;  $Pol$  - наличие поляризационных режимов.

Актуальность РЛД для потребителя задается параметром  $\Delta T$  заявки:

$$A_{П} = \{\Delta T\} \quad (3)$$

Остальным параметрами заявки описываются требования к полноте РЛИ:

$$V_{П} = \{(B_1; B_2), (L_1; L_2), \mathcal{D}, \mathcal{B}, \mathcal{L}, Pol\} \quad (4)$$

КС ДЗЗ  $I_{ПХ}$  описывается векторами технических характеристик  $\{ТТХ\}_{КРСА}$  элементов системы и орбитальными параметрами  $\{ОП\}$  группировки КРСА.

$$КС ДЗЗ = \{\{ТТХ\}_{КРСА}, \{ОП\}\} \quad (5)$$

Реализуемые значения элементов выражения (1) определяются элементами выражения (5). Учитывая, что  $I_{ПХ}$  КС ДЗЗ отражает важность получаемых радиолокационных данных (РЛД) для потребителя можно записать следующее выражение:

$$I_{ПХ} = \begin{cases} A_{КРСА} \leq A_{П} \Big|_{\{ТТХ\}_{КРСА}, \{ОП\}} \\ V_{КРСА} \geq V_{П} \Big|_{\{ТТХ\}_{КРСА}, \{ОП\}} \end{cases} \quad (6)$$

### Полнота РЛД

Полнота РЛД носит комплексный характер и включает пространственную полноту РЛД и информационную полноту РЛД (качество РЛД). Возможность выполнить наблюдение КРСА заданного потребителем участка ЗП дает представление о пространственной составляющей полноты прагматической характеристики. В первую очередь пространственная полнота определяется потенциальной возможностью наблюдения КРСА требуемого УЗП, во вторую очередь – наличием необходимых условий для наблюдения, а именно доступностью необходимого количества ресурсов бортового комплекса управления КРСА (БКУ КРСА) определенного типа.

Потенциальная пространственная полнота РЛД определяется значениями элементов вектора  $\{ОП\}$ , стороной обзора КРСА и значениями максимального и минимального угла крена диаграммы направленности антенны (ДНА). На рис.1. показаны нормированные зависимости потенциально доступной для наблюдения площади Земли  $S_{пот}$  для различных значений наклона орбиты  $i$  и интервалов углов крена ДНА  $[\gamma_{min}; \gamma_{max}]$  в зависимости от высоты орбиты КРСА.

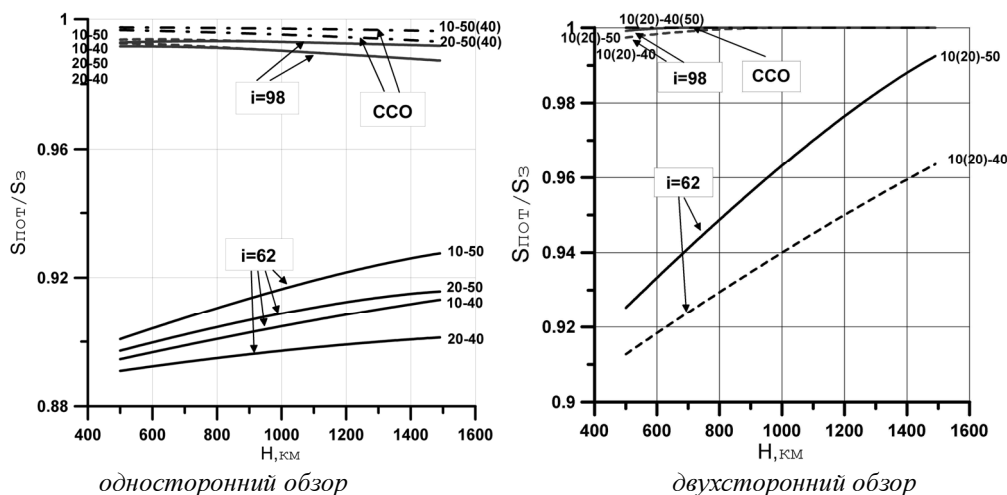


Рис. 1. Потенциальная площадь наблюдения ЗП с помощью КС ДЗЗ на основе КРСА

Требуемое значение информационной составляющей полноты РЛД достигается путем использования режимов наблюдения различного типа. В современных КС ДЗЗ используются три типовых режима наблюдения с характерными реализуемыми характеристиками (табл.1). При этом широкополосный режим доступен только при использовании активной антенной фазированной решетки (АФАР). Выбор режимов наблюдения, реализуемых КРСА, определяется на этапе конструирования, исходя из целевого предназначения КРСА.

Таблица 1. Типовые режимы наблюдения КРСА

Название режима	Полоса обзора, км	Разрешение РЛД, м	Количество ДНА
Полосовой (Strip)	40...160	5...30	1
Прожекторный (Spot)	5...10	0.7...2	1
Широкополосный (ScanSAR)	350...500	60...150	2-27

Для достижения требуемого значения информационной составляющей полноты, как и пространственной, помимо потенциальных возможностей необходимо наличие ресурсов БКУ КРСА определенного типа. Процесс наблюдения заданного УЗП включает два этапа. На первом этапе, требуется переориентация ДНА перед наблюдением заданного УЗП. Выполнение данного этапа зависит от используемого типа антенной системы (АС). В случае применения рефлекторной АС, жестко закрепленной на корпусе КРСА требуется переориентация всего КРСА. Наибольшая степень оперативности и точности переориентации КРСА достигается путем использования реактивных сопел [1], при этом затрачивается топливный ресурс  $RF$ . Применение АФАР не влечет затрат топливного ресурса, так как используется электронный способ управления ДНА. Топливный ресурс является не восстанавливаемым и определяется доступной массой рабочего тела [2]:

$$RF = m_0(1 - e^{-V_{\Sigma}/c_{cr}}), \tag{7}$$

где  $m_0$  - начальная масса  $RF$  до включения двигателей системы переориентации;  $V_{\Sigma}$  - характеристическая скорость, требуемая для переориентации;  $c_{cr}$  - скорость истечения продуктов сгорания.

Второй этап заключается непосредственно в наблюдении требуемого УЗП. При этом необходимо достаточное количество электрической энергии - энергетического ресурса  $RE$  для выполнения заданного режима наблюдения (см. табл.1) - и объема бортового запоминающего устройства (БЗУ) - информационного ресурса  $RI$ . В случае наличия распределенной сети

наземных приемных пунктов (НПП) или канала передачи РЛД через спутник-ретранслятор (КА-Р) требования к величине информационного ресурса БКУ КРСА снижаются, при этом достигается максимальная оперативность передачи РЛД в НПП. Данные типы ресурсов являются восстанавливаемыми. Количественно энергетический ресурс описывается зависимостью, учитывающей затраты бортовой аппаратуры и энергетику элементов системы энергоснабжения: солнечных и аккумуляторных батарей:

$$RE = f(k_3, E_{CB}, E_{YAB}, E_{AB \min}, P_{BA}, \dot{E}_{AB}), \quad (8)$$

где  $k_3$  - коэффициент, учитывающий потери в зарядно-разрядном устройстве и проводах;

$E_{CB}$  - энергия, вырабатываемая солнечными батареями (СБ);  $E_{YAB}$  - удельное значение энергии аккумуляторных батарей (АБ);  $E_{AB \min}$  - минимально допустимый уровень заряда АБ;  $P_{BA}$  - мощность, потребляемая бортовой аппаратурой;  $\dot{E}_{AB}$  - скорость заряда АБ.

Информационный ресурс БКУ КРСА определяется объемом физического носителя информации (магнитофон, твердотельная память), доступным для записи оцифрованных отсчетов квадратурных составляющих отраженного сигнала (цифровая радиоголограмма (ЦРГ)). Средняя скорость записываемого потока ЦРГ вне зоны радиовидимости НПП или КА-Р зависит от условий и требуемого режима наблюдения (см. табл.1). Емкость современных БЗУ достигает 500 Гбит. Освобождение БЗУ (восстановление информационного ресурса) осуществляется в ходе информационного обмена КРСА и НПП (КА-Р). Динамика использования  $RI$  описывается выражением:

$$RI(t) = V_{BZY \max} \left[ 1 - (t \cdot Pol \cdot V_{ЦРГ \text{ ср}} + t \cdot \Lambda) / V_{BZY \max} \right], \quad (9)$$

где  $V_{BZY \max}$  - объем БЗУ;  $V_{ЦРГ \text{ ср}}$  - средняя скорость генерации ЦРГ;  $Pol$  - признак использования поляризационных режимов ( $Pol = 1$  - однополяризационный режим,  $Pol = 2$  - двухполяризационный режим);  $\Lambda$  - скорость передачи данных в НПП.

Таким образом, полнота РЛД зависит от потенциальных возможностей КРСА, потенциальной площади доступной для наблюдения ЗП, наличия режима наблюдения КРСА с необходимыми характеристиками, а также доступности необходимого количества  $RE, RF, RI$  для осуществления процесса наблюдения КРСА участка ЗП.

$$V_{KPCA} = \{V_{\text{пр}}; V_{\text{инф}}\} \Big|_{RE, RF, RI} \quad (10)$$

### Актуальность РЛД

Предоставление РЛД потребителю в срок не позже указанного в заявке  $\Delta T$  определяет актуальность РЛД для потребителя и оперативность функционирования КС ДЗЗ. Типовой алгоритм обслуживания одной заявки потребителя КС ДЗЗ показан на рис.2.

Степень актуальности РЛД зависит от оперативности выполнения каждой операции алгоритма. Время выполнения некоторых операций полностью детерминировано, выполнение других возможно осуществить только при наличии определенного ряда условий. К таким операциям относятся подготовка и проведение сеанса управления (СУ), наблюдение УЗП, передача РЛД в НПП. Необходимые условия для операции наблюдения участка ЗП определяются условиями полноты РЛД, рассматриваемыми выше. Операции передачи временной программы (ВП) в ходе СУ и прием РЛД зависят от наличия информационного канала между элементами КС ДЗЗ: НПУ-КРСА-НПП.



Рис. 2. Обобщенный алгоритм обслуживания заявки потребителя

Интервал проведения СУ для различных современных КС ДЗЗ варьируется от одних до нескольких суток, что определяется требованиями потребителя  $\Delta T$  и возможностями КС ДЗЗ. Пространственно распределенная по географической широте сеть НПУ позволяет повысить частоту проведения СУ. Географическое расположение территории РФ, в отличие от других стран, позволяет разместить распределенную сеть НПУ для обеспечения наивысшей степени оперативности проведения СУ.

Оперативность наблюдения УЗП определяется  $\{ОП\}$ ,  $\{ТТХ\}_{КРСА}$ , а также наличием необходимого количества  $RE, RF, RI$ . На рис.3 показана временная диаграмма и условия наблюдения различных участков ЗП (г. Сочи  $B = 40.5$ с.ш.,  $L = 39.5$ в.д.; г. Плесецк  $B = 65.2$ с.ш.,  $L = 40.5$ в.д.) группировкой из четырех КРСА SAR-Lure в течение суток.

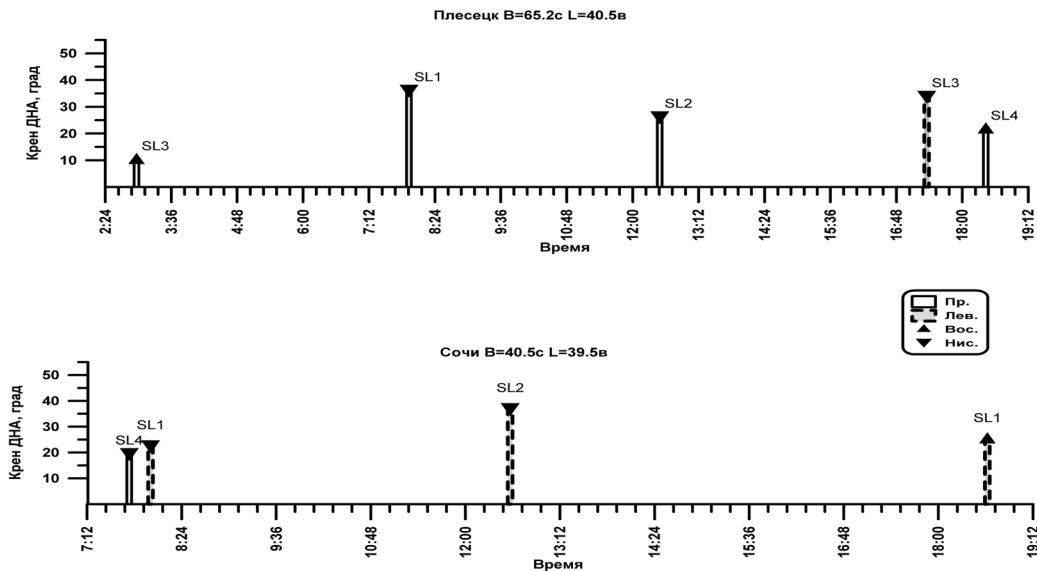


Рис. 3. Временная диаграмма наблюдения УЗП группировкой КРСА

Наблюдение УЗП при различных углах крена ДНА влечет различные затраты основных ресурсов БКУ КРСА. В целях рационального использования топливного ресурса в КРСА, фиксированную на корпусе рефлекторную АС целесообразно располагать под углом  $\gamma_{opt} = (\gamma_{max} - \gamma_{min})/2$ , при этом полоса наблюдения смещается относительно центра полосы обзора к ближней границе наблюдения. Для известного значения затрат рабочего тела при изменении угла крена КРСА на один градус можно определить расход  $RF$  при переориентации ДНА в пределах полосы обзора. На рис.2 показаны зависимости затрат  $RF$  при переориентации КРСА по углу крена для различных высот  $H$ .

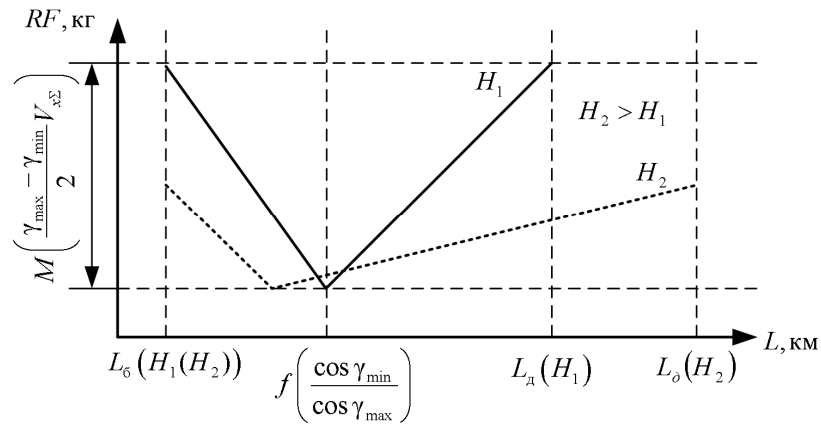


Рис. 4. Затраты  $RF$  при переориентации КРСА для различных высот орбиты

Затраты энергетического ресурса при наблюдении в пределах полосы обзора  $L_o$  можно определить исходя из значения средней мощности излучения  $P_{cp}$ , требуемой для достижения одинакового отношения сигнал/фон  $Q$  в пределах полосы обзора:

$$P_{cp} = \frac{(4\pi)^3 R^4(H, \gamma) P_{\phi} Q}{D^2 \sigma_{ц} \lambda^2} \cdot \tau_{и} \cdot \frac{2V_{отн}(i, B, H, \gamma)}{d_a}, \quad (8)$$

где  $R(H, \gamma)$  - расстояние до цели;  $P_{\phi}$  - значение мощности шумов фона;  $y_{ц}$  - ЭПР цели;  $d_a$  - горизонтальный размер антенны.

Зависимость (8) основана на уравнении дальности радиолокации [3] с учетом снижения мощности фона  $P_{\phi} = P_{\phi 0} \sin \text{УМ}$  (уменьшения ЭПР фона при снижении УМ наблюдения; при этом предполагается, что ЭПР цели постоянна для любых значений УМ), длительности излучаемых импульсов  $\phi_{и}$  и частоты их повторения  $F_{цпц}$ .

Среднее значение излучаемой мощности при условии постоянного отношения сигнал/фон на входе приемника в основном зависит от дальности наблюдения и мощности шума фона (рис. 4). Влияние относительной скорости незначительно.

Затраты информационного ресурса в пределах полосы обзора определяются мгновенной скоростью генерации отсчетов ЦРГ, разрядностью АЦП  $N_{АЦП}$  и числом поляризационных каналов. Значение средней скорости потока ЦРГ  $V_{ЦРГ\text{cp}}$  при использовании двухканального фазового детектора определяется длительностью регистрируемого сигнала  $T_{и}$  (см. рис. 1) и  $F_{цпц}$ :

$$V_{ЦРГ\text{cp}} = \frac{c N_{АЦП} T_{и} V_{отн}}{\rho_R \rho_{аз}}, \quad (9)$$

где  $c$  - скорость света в вакууме;  $\rho_R, \rho_{аз}$  - пространственное разрешение по дальности и азимуту.

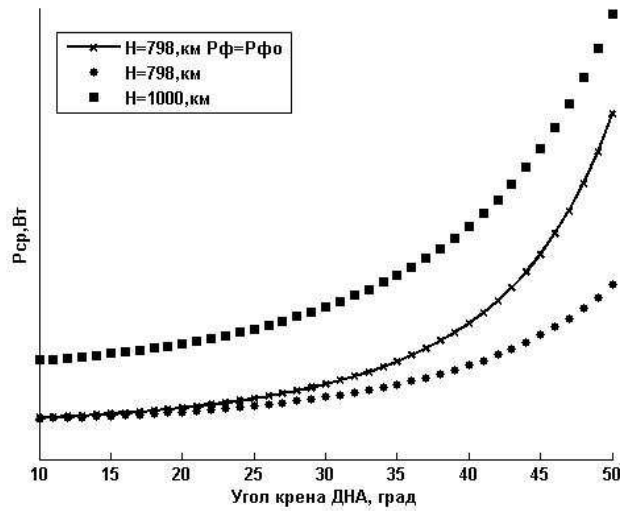


Рис. 5. Средняя излучаемая мощность для обеспечения постоянного отношения сигнал/фон в полосе обзора

На рис. 5 изображены зависимости  $V_{ЦРГ\text{ср}}$  для условий постоянной ширины ДНА  $\Theta_{\text{УМ}} = 1.5^\circ$  (полоса наблюдения увеличивается с увеличением угла крена ДНА), постоянной полосы наблюдения  $L_{\text{н}} = 20 \text{ км}$ , и устранения неоднозначностей по азимуту и дальности (период накопления отраженного сигнала  $T_{\text{н}}$  равен периоду повторения импульсов зондирования  $T_{\text{чпи}}$ ) в пределах полосы обзора  $L_0 = 450 \text{ км}$ .

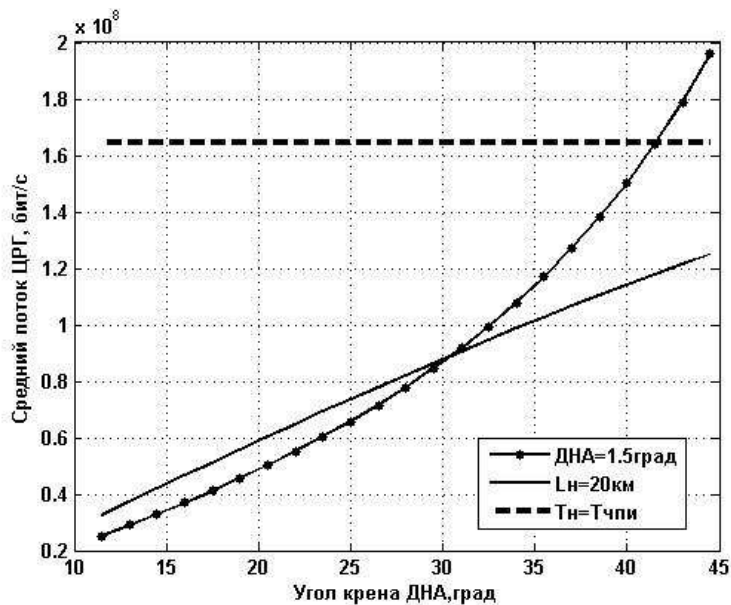


Рис. 6. Средняя скорость информационного потока

Оперативность передачи РЛД в НПП определяется режимом информационного обмена КРСА и НПП (табл. 2). Наибольшая оперативность достигается при использовании режимов ЗРВ-КА-Р, ЗРВ-НПП. Для РФ, в отсутствие на данный момент КА-Р с достаточной пропускной способностью  $\Lambda_{\text{КА-Р}} \sim 300 \text{ Мбит/с}$ , предпочтительно использовать второй режим информационного обмена.

Таблица 2. Режимы информационного обмена КРСА и НПП

№ n/n	Режимы информационного обмена КРСА и НПП	Обозначение режима
1	Наблюдение ПЗ при записи радиоголограммы в БЗУ	З-БЗУ
2	Наблюдение ПЗ при передаче радиоголограммы (без записи в БЗУ) в НПП через КА-Р	ЗРВ-КА-Р
3	Наблюдение ПЗ при передаче радиоголограммы (без записи в БЗУ) непосредственно в НПП	ЗРВ-НПП
4	Передача радиоголограммы в НПП с требуемой скоростью (воспроизведения с БЗУ) через КА-Р	В-БЗУ-КА-Р
5	Передача радиоголограммы в НПП с требуемой скоростью (воспроизведения с БЗУ)	В-БЗУ-НПП

Площадь участка ЗП доступного для наблюдения в режиме КРСА-НПП определяется  $\{ОП\}$ ,  $\{ТТХ\}_{КРСА}$ , географической широтой расположения НПП  $B_{НПП}$  и предельным значением угла места ДНА УМ, при котором еще сохраняется заданное отношение сигнал/шум принимаемого сигнала. На рис.7 показаны зависимости нормированных значений площади, потенциально доступной для наблюдения с одновременной передачей ЦРГ в НПП, для различных значений  $\{ОП\}$ ,  $\{ТТХ\}_{КРСА}$ ,  $\{ТТХ\}_{НПП}$ ,  $B_{НПП}$ .

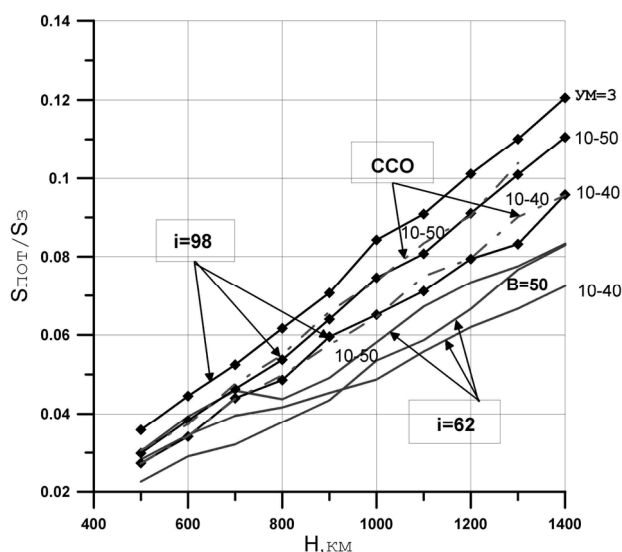


Рис. 7. Площадь ЗП, потенциально доступная для наблюдения в режиме информационного обмена КРСА-НПП

Таким образом, актуальность РЛД для потребителя, предоставляемых КС ДЗЗ на основе КРСА, определяется оперативностью выполнения операций обобщенного алгоритма обслуживания заявки (см. рис.2). Выполнение трех операций алгоритма определяет оперативность обслуживания заявки в большей степени и зависит от стационарных характеристик элементов системы:  $\{ОП\}$ , топологии размещения НПУ  $\{B, L\}_{НПУ}$  и НПП  $\{B, L\}_{НПП}$ , их технических характеристик  $\{ТТХ\}_{КРСА, НПП, НПУ}$ , а также динамики изменения ресурсного состояния БКУ КРСА.

$$A_{КРСА} = f(\{B, L\}_{НПУ}, \{B, L\}_{НПП}, \{ОП\}, \{ТТХ\}_{КРСА, НПУ, НПП}) \Big|_{RE, RF, RI} \quad (10)$$



## Заключение

Оценка КС ДЗЗ на основании прагматической характеристики представляет комплексную оценку процесса целевого функционирования КС ДЗЗ - обеспечение потребителей РЛД (2) с учетом влияния характеристик элементов системы, особенностей функционирования элементов системы и ограничений ресурсов БКУ КРСА, то есть является системной характеристикой. Основное отличие прагматической характеристики от существующих характеристик состоит в рассмотрении не только частных характеристик элементов КС ДЗЗ, полнота РЛД (разрешающая способность РЛД) или оперативность наблюдения УЗП (частота просмотра), а в учете особенностей процесса функционирования всей КС ДЗЗ при выполнении требований потребителей. Степень важности РЛД, предоставляемых КС ДЗЗ для различного рода потребителей, то есть соответствие РЛД заявке (2), позволяет оценивать прагматическую характеристику системы для оценки и сравнения существующих КС ДЗЗ, а также обоснованию рекомендации по выбору основных показателей элементов разрабатываемых КС ДЗЗ

## Литература

1. *Гуцин В.Н.* Основы устройства космических аппаратов: учебник для ВУЗов. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.
2. *Чернов А.А., Чернявский Г.М.* Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли: лекции и упражнения. – М.: Радио и связь, 2004. – 200 с.
3. *Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В.* Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны. – СПб.: СПбГУАП, 1999. – 220 с.
4. *Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю.* Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.

## Actuality and completeness of the radar image as pragmatical characteristics of space systems of remote sensing of the Earth

A.N. Zhegalov

*Military Space Academy of A. Mozhaisky*

The system characteristic of space system of remote sensing of the Earth, taking into account principles of functioning of elements of system, the requirement of a various sort of consumers, resource limitations is offered. The principle of a substantiation of the characteristic is based on definition of degree of importance of the got information of the remote sensing of Earth for an user. The basic differences of the offered characteristic are shown in comparison with the universally accepted characteristic. Conditions of functioning of elements of system are considered, and dependences describing them are resulted.

**Keywords:** Space system of remote sensing of the Earth, synthetic aperture radar (SAR) satellites, pragmatical characteristics, system estimation.