УДК 621.396.96

А. С. Гавриленко¹, В. Б. Ефимов¹, А. С. Курекин², Г. И. Клочко¹, А. Я. Матвеев¹, В. Н. Цымбал¹, С. Е. Яцевич²

¹Центр радіофізичного зондування Землі Національної академії наук України і Національного космічного агентства України, Харків

² Інститут радіофізики і електроніки Національної академії наук України, Харків

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ РАДИОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ И СРЕДСТВАМИ

Теоретично і експериментально показано можливість виявлення підповерхневих об'єктів, а також визначення їхніх параметрів з використанням даних багатоканального радіолокаційного зондування, зокрема багаточастотних і поляризаційних методів. Наведено багатоканальні радіозображення, отримані з борту літака-лабораторії, а також їхня тематична інтерпретація.

введение

Радиолокационные методы исследования природной среды в силу их разнообразных возможностей находят применение для решения широкого круга задач дистанционного зондирования. Одним из перспективных направлений радиолокационного дистанционного зондирования является наблюдение различных структур и объектов под слоем почвы. Достигается это за счет проникающих свойств длинноволновой части диапазона СВЧ-радиоволн. Поскольку характерная глубина проникновения радиоволн для большинства почвогрунтов составляет $\delta = \lambda \sqrt{\epsilon' / \pi \epsilon''}$ (λ — длина радиоволны, а ϵ' и ϵ'' действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости грунта), в длинноволновой части СВЧ-диапазона значение б для сухих песков может достигать многих десятков метров.

Многообразие задач подповерхностного зондирования вызывает различные подходы к их практическому решению. Очень широко используется подповерхностное радиолокационное зондирование при вертикальном облучении (радиовысотомерный режим), обеспечивающий измерение толщины слоистых сред [9]. При

© А. С. ГАВРИЛЕНКО, В. Б. ЕФИМОВ, А. С. КУРЕКИН, Г. И. КЛОЧКО, А. Я. МАТВЕЕВ, В. Н. ЦЫМБАЛ, этом для вертикального радиолокационного зондирования используются либо сверхширо-кополосные короткие радиоимпульсы, либо сложные частотно- или фазокодомодулированные сигналы.

Отдельные эксперименты, выполненные с использованием радиолокационных космических систем, например наблюдения подповерхностных структур в пустыне Сахара, в Саудовской Аравии при помощи РСА ИСЗ «Seasat», SIR-A,B [10, 11, 14], позволили убедиться, что и в режиме бокового радиолокационного обзора возможно получение информации о геологических структурах, находящихся под слоем песка.

Для обнаружения подповерхностных объектов и структур представляет интерес синхронное многочастотное радиолокационное зондирование, по крайней мере в дециметровом и метровом диапазонах, где значительны, но существенно различны глубины проникновения радиоволн в грунт.

ОСОБЕННОСТИ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В настоящее время нет однозначной физической модели, позволяющей строго описать процессы рассеяния радиоволн различными объектами, расположенными под слоем грунта. Ниже приводится упрощенная модель [3], которая

I. И. КЛОЧКО, А. Я. МАТВЕЕВ, В. Н. ЦЬ

позволяет интерпретировать результаты, полученные с использованием многочастотных РСА.

Радиолокационные сигналы при подповерхностном зондировании объектов (G) формируются в результате совместного влияния нескольких факторов: рассеяния на неровностях границы раздела воздух (среда 1) и грунта (среда 2); рассеяния на неоднородностях грунта; отражения от объекта G, находящегося на глубине Hпод поверхностью; дифракции и рассеяния волн на неровностях поверхности самого объекта G и т. д. (рис. 1). Так как для подповерхностного зондирования используются дециметровые, метровые и более длинные волны, объемным рассеянием можно пренебречь, поскольку размеры частиц фрагментов грунта и расстояния между ними намного меньше длины радиоволны. Для достаточно крупных и «гладких» (в масштабе длины волны) объектов G можно также пренебречь диффузным и дифракционным компонентами сигнала, рассеянного на G, ограничившись учетом только зеркально отраженных волн.

Если в качестве подповерхностного объекта *G* выступает плоская граница раздела Z = -Hдвух однородных сред 2 и 3, то удельное сечение обратного рассеяния от объекта G превышает сечение G_S рассеяния на неровностях грунта (граница раздела сред 1 и 2) в *K* раз. Для горизонтальной поляризации зондирующего сигнала коэффициент контраста K_H дается выражением [3]

$$K_H = \frac{\sigma}{\sigma_S} = \left| \frac{1 + \tilde{R}_l}{1 + R\tilde{R}_l} \right|^4, \tag{1}$$

а для вертикальной - выражением

$$K_V = \left| \frac{1 + \tilde{R}_1 + 2\tilde{R}_1 \frac{\sin^2 \Theta - \cos^2 \Theta}{\sin^2 \Theta + \cos^2 \Theta}}{(1 + R\tilde{R}_1)^2} \right|^2, \quad (2)$$

где \tilde{R}_1 — экспоненциальный множитель, R и R_1 — коэффициенты Френеля отражения поляризованных волн от границ раздела сред 1, 2 при Z = 0 и 2, 3 при Z = -H соответственно.

Особенностью этих формул является то, что коэффициенты контраста *К* не зависят от пара-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2009. Т. 15. № 4



Рис. 1. Схема формирования подповерхностных «сильных» отражений (см. текст)

метров шероховатостей, в частности от их энергетического спектра W, хотя отличный от нуля радиолокационный сигнал (при $\Theta \neq 0$) наблюдается только благодаря резонансному (избирательному) рассеянию [8] на шероховатых грунтах Z = S(x, y).

Зависимость толщины слоя H входит в эти формулы только в виде экспоненциального множителя \tilde{R}_{l} :

$$\tilde{R}_{l} = R_{l}e^{i\phi_{l}} = R_{l}e^{2kH(i\alpha-\beta)} = R_{l}e^{i\Phi-\Gamma}, \quad (3)$$

$$\alpha = \operatorname{Re}\sqrt{\varepsilon-\sin^{2}\Theta} \approx \sqrt{\varepsilon'-\sin^{2}\Theta}, \quad (3)$$

$$\beta = \operatorname{Im}\sqrt{\varepsilon-\sin^{2}\Theta} \approx \varepsilon''/2\sqrt{\varepsilon'-\sin^{2}\Theta}.$$

Здесь $\varepsilon' = \text{Re}\varepsilon; \ \varepsilon'' = \text{Im}\varepsilon, \ \Phi = 2kH\alpha, \ \Gamma = 2KH\beta$, причем предполагается, что поглощение в среде достаточно мало ($\varepsilon'' << \varepsilon' - \sin^2 \Theta$). Легко видеть, что K_H и K_V являются осциллирующими функциями не только толщины H, но и угла визирования Θ , длины волны λ . На этот факт было обращено внимание в работе [1], где была решена задача рассеяния на слое с двумя шероховатыми границами. Периоды осцилляций ΔH , $\Delta\Theta, \Delta\lambda$, по этим параметрам определяются из условия $\Delta\Phi = 2\pi$, откуда следует

$$\Delta H = \lambda / 2\sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \Theta} , \qquad (4)$$

$$\Delta \Theta = \lambda \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \Theta} / H \sin 2\Theta , \qquad (5)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda}{2H\sqrt{\varepsilon' - \sin^2\Theta}} .$$
 (6)

23

Максимальное значение контраста на горизонтальной поляризации

$$K_{H\max} = \left| 1 + \frac{\sqrt{\varepsilon - \sin^2 \Theta}}{\cos \Theta} \right|^4 \tag{7}$$

имеет место в отсутствии затухания ($\beta = 0$) при отражении от хорошо проводящей среды ($|\varepsilon_1| >> \varepsilon', R_1 \approx -1$) в условиях резонанса, когда

$$kH\sqrt{\varepsilon'-\sin^2\Theta} = \left(n+\frac{1}{2}\right)\pi.$$
 (8)

При выполнении условия (8) направление обратного рассеяния совпадает с направлением одного из пространственно-угловых интерференционных максимумов в среде 1, возникающих при многократном отражении от границ раздела Z = 0 и Z = -H преломленных плоских волн в среде 2.

Формулы (1) и (2) являются результатом учета бесконечного числа таких отражений. Однако разложение их по степеням параметра R_1 позволяет получить формулы для К, учитывающие любое конечное число отражений. В частности, если в среде 2 волна испытывает сильное затухание при распространении до границы слоя Z == -H и обратно ($\Gamma = 2kH\beta > 1$), или коэффициент отражения R_1 от границы Z = -H достаточно мал (что имеет место при $|\varepsilon_1 - \varepsilon| << |\varepsilon|$), либо, наконец, линейный размер L_G отражателя G в плоскости падения меньше, чем расстояние $MM' = 2H \sin \Theta / \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \Theta}$ между двумя последовательными отражениями луча от плоскости Z = -H, то в (1) и (2) можно ограничиться учетом только однократных отражений от G. В результате *К*_{*H*} можно выразить формулой

$$K_H = \overline{K}_H + \delta K_H, \qquad (9)$$

$$\overline{K}_{H} = 1 + 4e^{-2\Gamma} \left| R_{1}T_{2,1} \right|^{2};$$

$$\delta K_{H} = 4e^{-\Gamma} R_{e} (R_{1}T_{2,1}e^{i\Phi}),$$
(10)

где $T_{2,1}$ – коэффициент отражения от границы Z= = 0 волны, падающей на нее со стороны среды 2:

$$T_{2,1} = 1 - R = \frac{2K'_z}{K_z + K'_z} = \frac{2\sqrt{\varepsilon - \sin^2 \Theta}}{\cos \Theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \Theta}}.$$
 (11)

Формула для коэффициента контраста *K*_v при вертикальной поляризации имеет вид

$$T_{2,1} \to Q = \frac{2\cos\Theta'(\sin^2\Theta - \sqrt{\epsilon}\cos\Theta\cos\Theta')}{(\cos\Theta' + \sqrt{\epsilon}\cos\Theta)(\sin^2\Theta + \cos^2\Theta')}.$$
 (12)

В формулах (11) и (12) угол преломления Θ' является комплексным и определяется законом Снеллиуса: $\sin \Theta' = \sin \Theta / \sqrt{\epsilon}$. Рассчитанные по этим формулам контрасты К_{Н V} соответствуют учету в радиолокационном сигнале наряду с волнами, рассеянными непосредственно на границе раздела Z = S(x, y), также еще двух типов волн. В результате происходит так называемое усиление обратного рассеяния [2]. По этой же причине в формуле (10) возникает коэффициент 4 (а не 2, как должно быть при некогерентном сложении интенсивностей волн). Интерференция этих волн с волной, непосредственно рассеянной на границе $Z = \zeta$ (без прохождения в среду 2), приводит к появлению осциллирующего по параметрам H, Θ, λ слагаемого δK_H в формуле (9) с периодами осцилляций (4)-(6). Максимального значения К_н достигает при $\varepsilon \rightarrow \infty$ (объект *G* при этом является металлическим листом с размером $\lambda \ll L_G \ll MM_1$, находящимся на глубине Н в однородной среде с проницаемостью ε). В этом случае коэффициент отражения для горизонтальной поляризации равен $R_1 = -1$ и $R_1 = 1 - для$ вертикальной. Если пренебречь поглощением в среде 2 (Г<<1) и учесть, что $(T_{2,1})_{\text{max}} = 2$ (при $|\varepsilon| >> 1$), то легко получить следующие оценки:

$$(\bar{K}_H)_{\max} = 17, \ (\delta K_H)_{\max} = 8,$$
 (13)

т. е. максимально возможное значение контраста K_H равно 25 или 17.7 дБ.

Столь высокое значение контрастов при учете только однократных отражений от не очень протяженных подземных объектов ($L_G < MM_1$) могут реализоваться только при достаточно малом затухании волн в слое 2, когда выполняется неравенство

$$\Gamma = 2kH\beta = kH \frac{\varepsilon'}{\sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \Theta}} \ll 1.$$
 (14)

Типичные зависимости є' и є" от частоты приведены на рис. 2 [12]. В широком диапазоне частот ($10^6...10^9$ Гц) величина є' монотонно убывает с частотой. Зависимость же є" от *f* имеет ярко выраженную особенность: уменьшение є" в диа-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2009. Т. 15. № 4



Рис. 2. Типичные зависимости действительной (ε') и мнимой (ε'') части диэлектрической проницаемости почв в СВЧ-диапазоне

пазоне $10^8 - 10^9$ Гц является причиной существенного уменьшения затухания в дециметровом и метровом диапазонах. Конкретные значения є' и є'' существенно зависят также от влажности [6].

По формулам (10)–(12) были получены расчетные зависимости средних коэффициентов контраста K_H и K_V для двух длин волн — 23 см и 1.8 м (рис. 3, 4).

Расчеты контрастов отражений металлической пластины под слоем песка ($\varepsilon' = 3.2$, $\varepsilon'' = 0.01$) показывают, что при горизонтальной поляризации значения \overline{K}_H в секторе углов $\Theta = 20^{\circ}-80^{\circ}$ существенно выше, чем на вертикальной поляризации \overline{K}_V . Контраст \overline{K}_H слабо зависит от угла облучения Θ , в то время как \overline{K}_V имеет глубокий минимум вблизи угла Брюстера $\Theta = \Theta_R$, где $\sin^2\Theta_R = \varepsilon'/(\varepsilon'+1)$.

Из выражения (12) видно, что при $\varepsilon'' = 0$ и $\Theta = \Theta_B$ величина Q = 0, и следовательно, $\overline{K}_V = 1$, т. е. контраст полностью отсутствует.

Результаты проведенных расчетов достаточно хорошо согласуются со значениями контрастов, наблюдаемых на практике.

Рассмотренный механизм позволяет оценить возможность наблюдения объектов, расположенных в слое почвы и формирующих «сильные» отражения, на фоне рассеяния поверх-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2009. Т. 15. № 4



Рис. 3. Расчетные зависимости коэффициентов контрастов горизонтальной (K_H) и вертикальной (K_V) поляризаций от угла падения Θ в диапазонах волн 0.23 м (a, δ) и 2 м (e, c) для различных глубин H (тип почвы – песок)



Рис. 4. Расчетные зависимости коэффициентов контраста горизонтальной поляризации K_H от глубины отражателей H при $\Theta = 50^{\circ}$ для волн 0.23 м (*a*) и 2 м (*б*) для песка (1) и глины (2) соответственно

ностью. В этом варианте повышение потенциала локатора с целью увеличения глубины обнаружения не дает результата, так как с усилением отражений от подповерхностного объекта в той же мере возрастают отражения и от поверхности.

В варианте плоской верхней границы [3] повышение потенциала приводит к увеличению



глубины обнаружения, Это становится важным при обнаружении геологических структур или объектов под слоем грунта, поскольку в ряде случаев, например для сухого песка (є' = 2 – - *i*0.01), они могут обнаруживаться на значительных глубинах, т. е. наблюдаться без искажающего влияния культурного слоя. Определенные перспективы увеличения глубин наблюдения структур под песками связаны с удлинением волны РСА до декаметров. Однако это не позволит расширить диапазон глубин наблюдения глинистых почв, парметры которых приведены на рис. 2. Из рис. 5 видно, что глубина скинслоя для глины растет с длиной волны в диапазоне от 10 до 200 см, после чего увеличение глубины проникновения падающей волны ограничивается.

Далее представлены примеры использования радиолокационных средств дистанционного зондирования для наблюдения природных образований и искусственных сооружений, расположенных под поверхностью земли, т.е. под слабопоглощающим слоем.

ОСОБЕННОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПРИ МНОГОЧАСТОТНОМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ САМОЛЕТНЫМ КОМПЛЕКСОМ «МАРС»

Результаты теоретического анализа и моделирования процессов подповерхностного радиолокационного зондирования, представленные ранее, убедительно свидетельствуют о принципиальной возможности обнаружения радиолокационными средствами расположенных под поверхностью земли искусственных сооружений, геологических и гидрологических структур. При этом наиболее перспективным является использование многочастотного и многополяризационного радиолокационного зондирования одновременно в метровом и более коротковолновых (например сантиметровом и дециметровом) диапазонах радиоволн. Наилучшие результаты достигаются в аридных и других засушливых районах благодаря более глубокому проникновению в почву радиоволн. Многочисленные эксперименты подтверждают эти выводы [3, 10, 11, 13, 14].

Ниже приведены результаты специальных экспериментов по обнаружению подповерхностных объектов при помощи одновременного зондирования в миллиметровом, сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах длин многочастотным радиолокационным волн комплексом МРЛК «МАРС» [7]. В состав комплекса, установленного на борту самолета-лаборатории ИЛ-18Д, входили радиолокаторы бокового обзора миллиметрового и сантиметрового диапазонов, а также РЛС с синтезированием апертуры дециметрового и метрового диапазонов (РБО-08, РБО-3, РСА-23 и РСА-180). Для комплекса радиолокаторов характерны совмещенные полосы обзора (в среднем 30 км) и согласованное пространственное разрешение (в среднем 20-50 м).

Один из проведенных экспериментов по обнаружению подповерхностных объектов территориально проходил в в опустыненных районах Средней Азии. Поверхность, представляющая собой песчаные барханы, представляла идеальные условия для обнаружения объектов в силу сильного проникновения радиоволн под поверхность (рис. 2). Рабочие маршруты самолета-лаборатории проходили в центральных Каракумах неподолеку от Тедженского оазиса в Туркмении. Карта исследуемого района представлена на рис. 6. Восточнее Тедженского водохранилища и реки Теджен проходит шоссе Теджен — Серахс (обозначено на карте 8А). Между шоссе и р. Теджен расположена зона активного земледелия. Восточнее шоссе простираются пески. Данная ситуация прослеживается на оптическом изображении (рис. 7, а), полученном с природоох-



Рис. 6. Карта Тедженского оазиса



Рис. 7. Оптическое изображение Тедженского оазиса (*a*) и увеличенный фрагмент А (*б*). Стрелки – месторасположение объекта под поверхностью

ранного спутника (http://www.google.map.ru). На рис. 7, δ показан увеличенный фрагмент местности, на котором отлично видна дорога и линии электропередач вдоль нее. На рис. 8 представлены синхронные многочастотные изображения радиолокаторов комплекса «МАРС» ($a - PEO-08, \delta - PEO-3, e - PCA-23BB, e - PCA23\Gamma\Gamma$), полученные по этому же району. Сравнение оптического и радиолокационных изображений дает возможность уверенного обнаружения периодического протяженного подповерхностного объекта, который расположен



Рис. 8. Радиолокационные изображения района Тедженского оазиса: a - PEO-08, $\delta - PEO-3$, e - PCA-23BB, $e - PCA-23\Gamma\Gamma$

параллельно шоссе на расстоянии 2 км вглубь песчаного массива. В отличие от оптического (на рис. 7, δ стрелками указано местоположение подповерхностного объекта) и коротковолновых радиолокационных изображений в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн этот объект с большим контрастом отображается в дециметровом диапазоне на горизонтальной поляризации, что подтверждает вышеприведенные теоретические предпосылки.

В условиях грунтов, характерных для средней полосы Украины, где преобладают различного вида черноземы, был проведен эксперимент по



Рис. 9. Схематическое изображение подповерхностного объекта



Рис. 10. Внешний вид места расположения подповерхностного объекта



Рис. 11. Внешний вид места крепления антенной мачты

обнаружению тестового объекта с известными характеристиками.

Подповерхностный объект представлял собой систему небольших подземных бетонных



Рис. 12. Вид на внутренность бетонного бункера через люк. Наблюдаются остатки кабелей и оборудования, кабельные каналы и т. п.

бункеров, соединенных между собой и с основанием антенны системой кабельных каналов (рис. 9). Обстановка на поверхности над бункерами представлена на рис. 10 и 11, а вид внутренности — на рис. 12. Объект был оставлен после расформирования одной из частей Советской армии и представляет собой основной бункер, расположенный на глубине 4 м под поверхностью, малый бункер с металлическим люком, систему кабельных каналов и бетонное основание для установки антенной мачты. Поверхность над объектом покрыта асфальтовой дорожкой. Вокруг растет густая многолетняя трава. Общая протяженность объекта достигает 170 м.

На рис. 13 представлены радиолокационные изображения исследуемой территории в сантиметровом (a), дециметровом (δ) и метровом диапазонах радиоволн (s), а также карта, соот-



Рис. 13. Радиолокационное изображение исследуемого района: *а* – в см-диапазоне, *б* – в дм- диапазоне, *в* – в м-диапазоне (стрелка 1 – изображение подземного объекта); *г* – топографическая карта участка радиолокационной съемки (крестик – место расположения подземного объекта). (см. также с. 30)

ветствующая участку радиолокационной съемки (г).

На сантиметровом радиолокационном изображении хорошо наблюдаются лишь поверхностные образования — растительность и т. п. На нем стрелкой показано место расположения подземного объекта. На дециметровом радиолокационном изображении наблюдаются лишь

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2009. Т. 15. № 4



Рис. 13. Окончание

более крупные поверхностные образования — искусственные сооружения, кустарник, лес и т. п., трава в районе исследуемого объекта не видна, но сам объект также не виден. На метровом радиолокационном изображении наблюдаются подповерхностные объекты, а поверхностные образования (трава и т. п.) не наблюдаются. Стрелкой показано изображение подземного объекта. Эксперимент подтвердил возможность наблюдения «сильных» подповерхностных объ-





Рис. 14. Радиолокационные изображения района, прилегающего к станции Чертомлык (Днепропетровская обл.): a - PCA-M, вертикальная поляризация излученного и принятого сигнала (BB), $\delta - PCA-M$, горизонтальная поляризация (ГГ), e - PEO-CM, вертикальная поляризация (BB), e - PEO-MM, вертикальная поляризация (BB)

ектов (расположенных на глубине 3—4 м) многочастотным радиолокационным способом в условиях черноземно-глинистых грунтов средней полосы.

Влияние поляризации радиосигналов метрового диапазона при наблюдении подповерхностных объектов может быть проиллюстрировано изображениями района, прилегающего к станции Чертомлык (Днепропетровская обл.), полученными РБО-08, РБО-3, РСА-23 и РСА-180 МРЛК «МАРС» (рис. 14).

При сравнении представленных изображений можно заметить разницу проникающей способности радиоволн различных диапазонов. Проявления подповерхностных объектов наблюдаются на радиоизображениях метрового диапазона (PCA-M, $\lambda = 1.8$ м), их местоположение отмечено стрелками на всех изображениях. Как и было отмечено выше при анализе результатов модельных экспериментов на изображениях с ГГ-поляризацией, эти образования наблюдаются с большим контрастом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических исследований показана возможность обнаружения подповерхностных объектов, а также определения их параметров с использованием данных многоканального радиолокационного зондирования, в частности многочастотных и поляризационных методов. Тематическая интерпретация экспериментальных радиоизображений, полученных на борту самолета-лаборатории ИЛ-18Д в широком диапазоне частот, показала возможность проявления подповерхностных объектов с высоким контрастом на горизонтальной поляризации в дециметровом и метровом диапазонах радиоволн.

В проведенных работах по выявлению подповерхностных объектов использовалось невысокое разнообразие маскирующей подстилающей поверхности на тестовых полигонах. В последующих экспериментах целесообразно расширить разнообразие почв, характерных для различных климатических зон в различные сезоны.

- Брюховецкий А. С. Некогерентное рассеяние радиоволн шероховатой слоистой почвой. Борновское приближение для ЭПР // Межвед.науч.-техн. совещание «Статистические методы и системы обработки данных дистанционного зондирования окружающей среды»: Тез. докл. (Минск, 1–3 ноября 1989 г.). – Минск. Изд-во БГУ, 1989.
- Заворотный В. У., Татарский В. И. Эффект усиления обратного рассеяния волн на теле, расположенном вблизи случайной границы раздела двух сред // Докл. АН СССР. – 1982. – 265, № 3. – С. 608–611.
- Калмыков А. И., Фукс И. М., Цымбал В. Н. и др. Радиолокационные наблюдения сильных отражателей, расположенных под слоем почвы. Модель подповерхностных отражений. –: Харьков, 1993. — 30 с. — (Препринт / АН УССР. Ин-т радиофизики и электроники; № 93-6).
- Калмыков А. И., Цымбал В. Н., Курекин А. С. и др. Многоцелевой радиолокационный самолетный комплекс исследования Земли «МАРС» // Радиофизика и Радиоастрономия. – 1998. – 3, № 2. – С. 119–129.
- 5. *Кронберг П*. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии: Пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.
- Лещинский Ю. М., Лебедева Г. Н., Шумилин В. Д. Электрические параметры песчаного и глинистого грунтов в диапазоне сантиметровых, дециметровых и метровых волн // Изв. вузов. Радиофизика. — 1971. — 14, № 4. — С. 562—569.
- Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей / Под ред. С. Н. Конюхова, В. И. Драновского, В. Н. Цымбала. – Киев: Джулиа принт, 2007. – 439 с.
- Райзер В. Ю., Зайцева И. Г., Анискевич В. М., Эткин В. С. Определение физических параметров морского льда по данным дистанционных СВЧ-измерений в диапазоне 0.3–18 см // Исслед. Земли из космоса. – 1985. – № 1. – С. 23–31.

- Финкельштейн М. И., Мендельсон В. Л., Кутев В. А. Радиолокация слоистых земных покровов. — М.: Сов. радио, 1977. — 174 с.
- Berlin G. L., Tarabzonni M. A., Al. Naser A. H., et al. SIR-B subsurface imaging of a sand-buried landscape: Al Laban Plateau, Saudi Arabia // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. — 1986. — GE-24, N 4. — P. 595— 602.
- Elashi C., Roth L. E., Schaber G. G. Spaceborne radar subsurface imaging in hyperarid regions // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 1986. – GE-22, N 4. – P. 383–387.
- Hoekstra P., Delaney A. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies // J. Geophys. Res. – 1974. – 79, N 11. – P. 1699–1708.
- Kalmykov A. I., Tsymbal V. N., Matveev A. Ya., et al. The Two-Frequency Multipolarisation L/VHF Airborne SAR for Subsurface Sensing // AE International Journal of Electronics and Communications. Archiv fr Electronik und bertragunstechnik. — 1996. — 50, N 2. — P. 145– 149.
- McCanley J. F., Shaber G. G., Breed C. S., et al. Subsurface valleys and geoarcheology of eastern Sahara revealed by Shuttle radar // Science. – 1982. – 218, N 4576. – P. 1004–1020.

Надійшла до редакції 13.04.09

A. S. Gavrilenko, V. B. Yefimov, G. I. Klochko, A. S. Kurekin, A. Ya. Matveev, V. N. Tsymbal, S. Ye. Yatsevich

REMOTE SENSING OF SUBSUPERFICIAL OBJECTS BY RADIOPHYSICAL METHODS AND FACILITIES

The possibility to determinate the manifestation of subsurface objects and their parameters using multichannel radar sensing, in particular, multifrequency and polarization methods, is shown theoretically and experimentally. Multichannel radar images obtained aboard of an airplane-laboratory and their thematic interpretation are presented.